

Bewertung industrieller Trocknungsprozesse

30.09.2021



EE4InG

Energieeffizienz für Industrie
und Gewerbe



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

PTW

TU DARMSTADT



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

Projektleitung

Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele

Jessica Walther

Technische Universität Darmstadt

Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW)

Eugen Kogon Straße 4

D – 64287 Darmstadt

Tel. + 49 (6151) 16 20478

Fax + 49 (6151) 16 20087

info@ptw.tu-darmstadt.de

Verfasser:innen der vorliegenden Untersuchung:

Technische Universität Darmstadt

Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW)

Prof. Dr.-Ing. Matthias Weigold

Ghada Elserafi

Kontakt:

Ghada Elserafi

Eugen-Kogon-Straße 4

D – 64287 Darmstadt

Tel. +49 (0) 6151 / 8229742

g.elserafi@ptw.tu-darmstadt.de

Inhaltsverzeichnis

0.	Kurzdarstellung der genutzten Methodik EDUAR&D	1
1.	Beschreibung der untersuchten Technologie	3
2.	Marktkontexturierung.....	5
3.	Energietechnische und -wirtschaftliche Bewertung.....	8
4.	Technologiezyklusanalyse.....	14
5.	Innovationssystemanalyse	15
6.	Ableitung möglicher Entwicklungsziele (technisch und ökonomisch)	19
7.	Identifikation von technologischen und ökonomischen Engpässen und Markthemmnissen	23
8.	Empfehlungen und mögliche Policy-Maßnahmen.....	26

0. Kurzdarstellung der genutzten Methodik EDUAR&D

EDUAR&D, kurz für „Energiedaten und -analyse R&D“, ist die im Rahmen des Projekts EE4InG genutzte Methodik zur Bewertung von vielversprechenden Technologien, die potenziell zu einer erheblichen Senkung des Energiebedarfs und/oder der Treibhausgasemissionen in den Forschungsfeldern (und teilweise darüber hinaus) beitragen könnten. EDUAR&D ist ein strukturierter Such- und Analyseprozess, der verschiedenste methodische Ansätze zur Darstellung, Analyse und Bewertung der Technologien miteinander verbindet. Dabei muss nicht zwangsläufig jede EDUAR&D-Analyse das gesamte Tableau der zur Verfügung stehenden Optionen nutzen: dies ist teilweise abhängig von den zur Verfügung stehenden Informationsquellen. Ziel ist es, Handlungsempfehlungen (z. B. bzgl. thematischer Schwerpunktsetzungen, Intensivierung bestehender Förderungen, etc.) insbesondere für die zukünftige Energieforschung des Bundes abzuleiten. Die EDUAR&D-Methodik wurde im Auftrag des BMWi am Fraunhofer Institut für System- und Innovationsforschung entwickelt [1].

Abbildung 0-1 zeigt den typischen Gesamtablauf des EDUAR&D-Prozesses.



Abbildung 0-1: Typische Struktur von EDUAR&D

Quelle: Eigene Darstellung IREES

Für die durch einen knappen Vorauswahl-Prozess identifizierte Technologie (beispielsweise anhand ihrer potenziellen Relevanz für den Energieverbrauch oder die THG-Emissionen einer Branche oder eines bestimmten Produktionsprozesses) wird zunächst eine Marktkontexturierung durchgeführt. Diese beschreibt die Regionalität der denkbaren Märkte und die derzeitige oder absehbar überwiegende Marktform (Monopol – Polypol) sowie mögliche Konkurrenztechnologien und die hierdurch absehbare Wettbewerbsintensität.

Zentraler und komplexester Teil ist die dreigliedrige Analyse, die aus einer energetischen /-wirtschaftlichen Bewertung, einer Technologiezyklus-Analyse sowie einer Innovationssystem-

Analyse besteht. Die energietechnische/-wirtschaftliche Bewertung kann verschiedene Komponenten beinhalten, wie eine erste Abschätzung des möglichen Einflusses der Technologie auf den Energiebedarf und die THG-Emissionen (entsprechende Diffusion vorausgesetzt), die Angabe von Kosten-Nutzen-Indikatoren sowie weitere, auch qualitative Bewertungen, z. B. bzgl. möglichem Exportpotenzial. Die Technologiezyklus-Analyse dient dazu, die technologische und ökonomische Marktnähe der Technologie besser verorten zu können. Die sechs Phasen des Technologiezyklus können auch dazu dienen, je nach Verortung der Technologie zielgerichtete Handlungsempfehlungen abzuleiten. Die Verortung im Technologiezyklus kann durch Patent- und Publikationsanalysen unterstützt werden (z. B. über das Verhältnis von Grundlagen-/Anwendungspatenten, Zunahme oder Abnahme von Patenten und Publikationen über die Zeit). Auch eine SWOT-Analyse kann Bestandteil der Technologiezyklus-Analyse sein. Gemäß der Definition in [2] generieren, verbreiten und nutzen Innovationssysteme Innovationen. Sie setzen sich zusammen aus Komponenten und Relationen, wobei erstere Akteure, Technologien und den regulatorischen Rahmen (inkl. Förderpolitik) umfassen, und letztere die vielfältigen formellen und informellen Beziehungen zwischen diesen Komponenten.

Die Analyse schließt mit der Identifikation möglicher Entwicklungsziele, von technologischen und ökonomischen Engpässen und Markthemmnissen aus den vorherigen Analyseschritten. Hieraus werden dann wiederum Handlungsempfehlungen abgeleitet.

Im Rahmen des Vorhabens EE4InG dienen die EDUAR&D-Technologieanalysen auch als Input für Expertengespräche und werden in Folge dieser Gespräche nach Bedarf angepasst.

1. Beschreibung der untersuchten Technologie

Unter Trocknung versteht sich die teilweise oder vollständige Entfernung von Feuchte aus einem Gut. Am häufigsten wird unter diesem Begriff die thermische Entfeuchtung verstanden, bei der die Feuchtigkeit durch Verdunstung oder Verdampfung entfernt wird. [3]

Die Einsatzgebiete industrieller Trocknung sind vielfältig, diese wird z. B. eingesetzt, um Qualitätseigenschaften der Trocknungsgüter zu verbessern oder zu erhalten, deren Transportierbarkeit oder Verwendbarkeit zu ermöglichen oder deren Haltbarkeit zu verlängern. Trocknungsprozesse spielen auch energetisch eine erhebliche Rolle bei Prozesswärmeanwendungen unter 200 °C. Hier gehören insbesondere die Herstellung und Bearbeitung von Holz, Papier und Lebensmitteln zu den energieintensiven Branchen im Bereich der Trocknung. [4]

Die Trocknung kann grundsätzlich durch drei verschiedene Prinzipien durchgeführt werden; thermisch, mechanisch oder sorptiv. Abbildung 1-1 gibt eine Übersicht der verschiedenen Trocknungsprozesse.

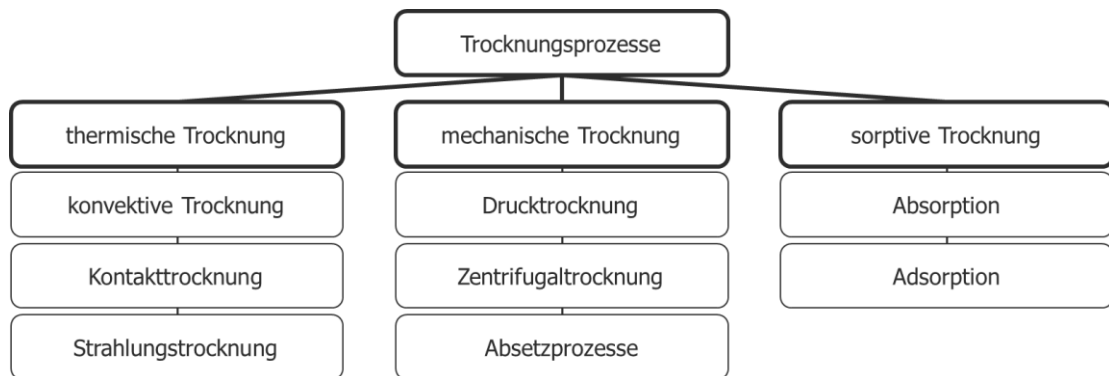


Abbildung 1-1: Übersicht der verschiedenen Trocknungsprozesse [4]

Bei der **thermischen Trocknung** wird die Flüssigkeit verdunstet und anschließend abtransportiert. Dabei spielt in der deutschen Industrie besonders die Unterkategorie **konvektive Trocknung** eine Rolle, die derzeit die am flexibelsten einsetzbare Trocknungsart ist. Dabei kann das Trocknungsgas aufgewärmt sein (z. B. Heißlufttrocknung). In diesem Fall ermöglicht das Trocknungsgas (z. B. Luft oder Dampf) den Wärmetransport zu dem Trocknungsgut. Da das Trocknungsgut je nach Vorprozessen bereits aufgewärmt sein kann, kann in manchen Fällen auch aufgrund der Eigenwärme des Trocknungsguts auf die Erwärmung des Trocknungsgases verzichtet werden. Hier dient das Trocknungsgas lediglich zum Abtransport der Feuchtigkeit. Der hohe Energiebedarf dieser Trocknungsvariante liegt in den notwendigen Wärmeübergängen zwischen Umgebungsluft und Trocknungsgut bzw. in dem Phasenwechsel des Wassers begründet [4].

Bei der Unterkategorie **Kontakt Trocknung** liegt das zu trocknende Gut auf heißen Flächen und nimmt dadurch Wärme auf. Im Kontaktrockner wird das feuchte Gut durchmischt, um die Wärmeübertragung zu erhöhen. Die Kontakt Trocknung spielt besonders in der Lebensmittelindustrie eine Rolle. Die dritte Unterkategorie **Strahlungstrocknung** wird beispielsweise durch die Infrarot-Trocknung (IR-Trocknung) vertreten, wobei der Wärmeeintrag durch Wärmestrahlung bereitgestellt wird. Im weiteren Sinne zählt die Induktionstrocknung bei metallischen Trocknungsgütern auch zu den Strahlungstrocknungsarten, wobei in diesem Fall durch die elektromagnetische Induktion von Wirbelströmen im Inneren des Guts dessen Erwärmung verursacht wird. Eine Sonderform der thermischen Trocknung ist die Vakuumtrocknung, die mit verschiedenen Wärmeübertragungsarten umgesetzt werden kann. Dabei wird die Trocknungskammer auf einen niedrigen Druck evakuiert,

wodurch bereits bei niedrigen Temperaturen das anhaftende Wasser verdampft, da die Siedetemperatur von Wasser mit abnehmendem Druck sinkt. [4]

Bei der **mechanischen Trocknung** wirken mechanische Kräfte, die die Flüssigkeit von der Oberfläche entfernen, z. B. durch Filter oder Zentrifugen. Die mechanische Trocknung wird mehr als vorgelagerter Schritt zur Haupttrocknung eingesetzt, um das Trocknungsgut vorzuentfeuchten. [4]

Bei der **sorptiven Trocknung** kommen sorptive Materialien zum Einsatz, die die Flüssigkeit aufsaugen, z. B., indem die Trocknungsluft durch ein sorptives Material entfeuchtet wird und über die feuchten Bauteile rezirkuliert wird, um das Aufnahmevermögen von Feuchtigkeit zu erhöhen. [4]

In der deutschen Industrie ist die Konvektionstrocknung mit Abstand am weitesten verbreitet [4]. Hinsichtlich der Trocknerbauart wird die Konvektionstrocknung am häufigsten mit Band-, Durchström-, Kammer- und Kanaltrocknern vertreten. Die Strahlungstrocknung mit IR wird ebenfalls breit eingesetzt. Diese kommt als alleinige Trocknungstechnologie in IR-Strahlungstrocknern zum Einsatz, wird aber auch in IR-Konvektionstrocknern mit der Konvektionstrocknung kombiniert. Zudem spielt die Kontaktstrocknung (Wärmeeintrag ins Trocknungsgut über beheizte Oberflächen) eine große Rolle in der deutschen Industrie. [5] Aufgrund dieser Ausgangslage liegt der Fokus im weiteren Verlauf auf der thermischen Trocknung.

Je nach Trocknerbauart sind auch verschiedene Energieverbraucher in der Trocknungsanlage zu berücksichtigen. In allen Fällen ist aber die Beheizung auch unabhängig von der Bauart der größte Energieverbraucher, da hierüber die Wärme zur Trocknung bereitgestellt wird. Die Beheizung ist in vielen Fällen brennstoffbasiert, bei der Strahlungstrocknung aber häufig strombasiert. Je nach Anwendungsfall kann die Trocknungstemperatur unterschiedlich sein, ein Großteil der Trocknungsprozesse läuft jedoch im Bereich unter 200 °C ab. [4]

Insbesondere in der Konvektionstrocknung, aber auch in der Kontaktstrocknung sind meistens Gebläse verbaut, die die Konvektion über das Trocknungsgas ermöglichen und/oder zum Abtransport der verdampften Flüssigkeit. Je nach zu trocknender Flüssigkeit oder Trocknungsgas kann auch eine Abluftbehandlung notwendig sein, die vor allem die Freisetzung von Schadstoffen in die Umgebung verhindern oder minimieren soll. In der Kontaktstrocknung trägt eine Mischvorrichtung dazu bei, das Trocknungsgut auf der Heizfläche durchzumischen, um eine möglichst homogene Wärmeverteilung zu gewährleisten. Unabhängig von der Trocknerbauart kann bei höheren Betriebstemperaturen die Kühlung von wärmeempfindlichen Komponenten, wie z. B. Dichtungen oder Motoren, notwendig sein. Eine Übersicht der wichtigsten Energieverbraucher ist in Tabelle 1-1 gegeben. Dabei werden grundsätzlich notwendige Energieverbraucher für die jeweilige Trocknerbauart mit „x“ gekennzeichnet, während optionale Energieverbraucher mit „(x)“ gekennzeichnet werden. [6, 7]

Tabelle 1-1: Wichtigste Energieverbraucher unterschiedlicher Trocknerbauarten. [6, 8]

Komponente	Konvektionstrocknung	Strahlungstrocknung	Kontaktstrocknung
Beheizung	x	x	x
Gebläse	x	(x)	x
Abluftbehandlung	x	(x)	x
Mischvorrichtung	-	-	x
Komponentenkühlung	(x)	(x)	(x)

2. Marktkontextuierung

Wie in Kapitel 1 bereits erwähnt, kommen Trocknungsprozesse in verschiedenen deutschen Industriesektoren zum Einsatz. Die Anforderungen an den Trocknungsprozess werden unter anderem durch den Trocknungsgrund definiert. Gründe zur Trocknung sind z. B. die Erhöhung der Lebensdauer und Erhaltung von Qualitätseigenschaften des Trocknungsguts. Durch eine Trocknung wird das Trocknungsgut in vielen Fällen aber auch besser transportierbar, bearbeitbar oder überhaupt verwendbar [4]. Allein im Maschinenbau können die Trocknungsgründe von der Vorbereitung vor der Beschichtung oder vor Prüfverfahren bis zur Vorbehandlung vor dem Fügen reichen [9]. Analog zur Vielfalt der Trocknungsgründe findet sich auch eine Vielfalt in der Form des Trocknungsguts. Am häufigsten sind Trocknungsgüter in Form von Schüttgut, Stückgut, Pasten, Schlämmen und Faserstoffen vertreten [5]. Vor diesem Hintergrund wird die Trocknung als Querschnittsprozess betrachtet.

Auch aus einer energetischen Perspektive spielt die Trocknung eine signifikante Rolle in der deutschen Industrie, da ein Hauptteil der bis 200 °C eingesetzten Prozesswärme für Trocknungsprozesse verbraucht wird [10]. Größte Energieverbraucher sind vor allem in den Branchen der Lebensmittelindustrie, Papierherstellung und Druckerei, Holzverarbeitung, Lacken, Gummi- und Kunststoffwaren sowie Chemie und Keramik zu finden [4]. Eine Übersicht der entsprechenden in [4] geschätzten Energieverbräuche gibt Abbildung 2-1.

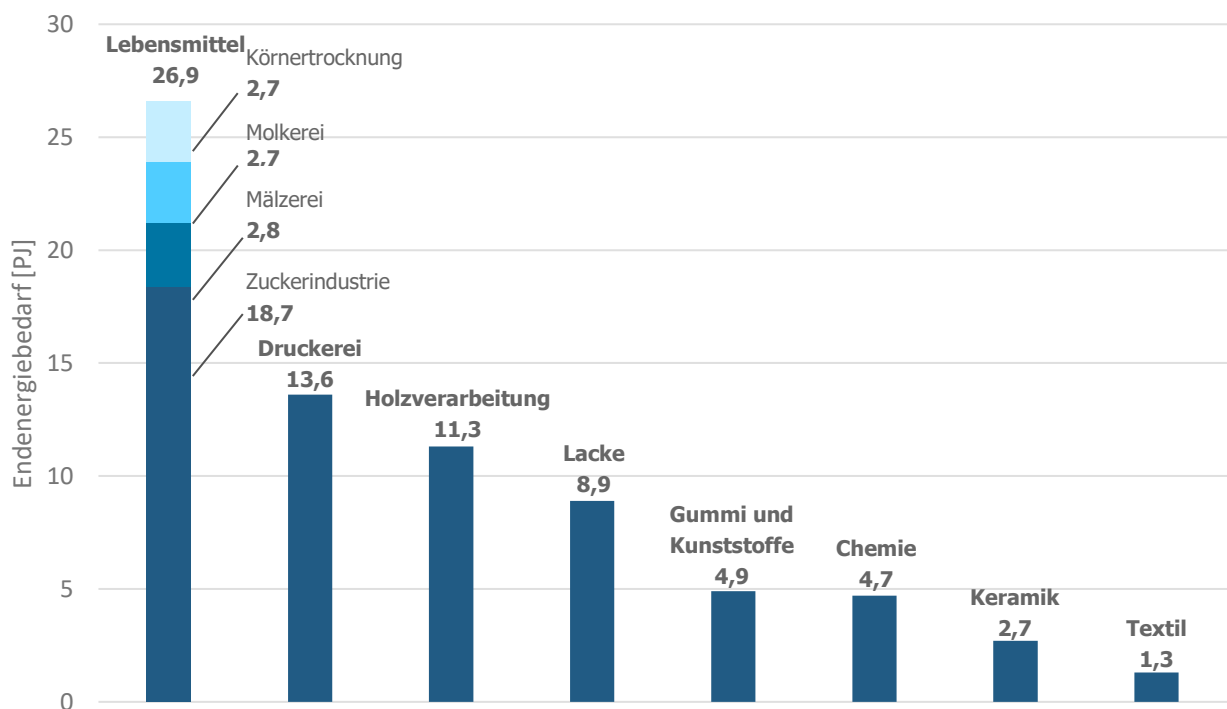


Abbildung 2-1: Geschätzte Energieverbräuche von Trocknungsprozessen in verschiedenen Branchen [4]

Aufgrund der großen Anwendungsbreite ist es schwierig, die Anzahl der eingesetzten Trockner in Deutschland zu ermitteln. Eine weitere Herausforderung stellt die uneindeutige Abgrenzung zwischen Trocknungsanlagen und Thermoprozessanlagen, die z. B. in der chemischen Industrie häufig zum Einsatz kommen, dar. Nach [4] ist von einer Mindestanzahl von 20.800 Trocknern in der deutschen Industrie auszugehen, wovon bereits 12.500 Trockner allein in der Lebensmittelindustrie verortet sind. Das Energieeinsparpotenzial für Trocknungsanlagen im Bestand ist mit

Energieeinsparungen einzelner Energieeffizienzmaßnahmen von jeweils 20-55% dementsprechend signifikant [4, 11, 12]. Nach [5] gibt es in Deutschland mindestens 61 Hersteller von Trocknungsanlagen, die hinsichtlich Trocknerbauart, Anwendungsbereich und Produktform Trocknungsanlagen für eine große Bandbreite an Anwendungen anbieten. Einem 2021 im Rahmen des Projektes durchgeführten Fachgespräch mit Herstellern und Anwendern von Trocknungsanlagen zufolge ist der Markt für Trocknungsanlagen hinsichtlich der Hersteller sehr breit aufgestellt. Hier bieten kleine und mittelständische Unternehmen bis hin zu großen Konzernen Trocknungsanlagen an [7].

Zur weiteren Marktkontextuierung wird der Fokus im Folgenden auf zwei Bereiche des Maschinenbaus gelegt; nämlich die Trocknung im Rahmen der Bauteilreinigung und die Trocknung im Zusammenhang mit Lackierung.

Trocknung in der Bauteilreinigung

Die Bedeutung der Bauteiltrocknung hängt stark mit der der wässrigen Bauteilreinigung zusammen, da hiermit insbesondere bei metallischen Bauteilen eine Korrosionsgefahr minimiert werden kann. Neben der Reinigung spielt auch die Trocknung für die Bauteilqualität und -lebensdauer eine wichtige Rolle und ermöglicht Nachfolgeprozesse wie z. B. Beschichten oder Fügen. [13] Als weltweit größter Abnehmer für industrielle Bauteilreinigungsanlagen stellt die Automobilindustrie immer höhere Anforderungen an die Sauberkeit, woraus sich im Rahmen des Produktionsumfelds mit kurzen Taktzeiten ein Optimierungsdruck für den Reinigungs- und indirekt Trocknungsprozess ergibt [14].

Vor diesem Hintergrund hat einer Umfrage zufolge die industrielle Bauteilreinigung in den letzten Jahren im Rahmen der Qualitätssicherung an Bedeutung gewonnen. Ein Großteil der teilnehmenden Hersteller und Anwender aus der Umfrage schätzen dementsprechend die Bauteilreinigung gewinnbringend zur Wertschöpfung eines Produkts ein. [9]

Sowohl auf Anwender- als auch auf Herstellerseite werden Nassreinigungsverfahren favorisiert, wovon ein Großteil mit wässrigen Reinigern eingesetzt werden. Gleichzeitig haben organische Lösemittel in der Bauteilreinigung in den letzten Jahren deutlich an Bedeutung verloren, was unter anderem in deren Auswirkungen auf die Atmosphäre begründet liegt. [9] Je nach Reinigungszweck und Werkstoff findet oft ein Trocknungsschritt anschließend an die Reinigung statt, dabei sind die Reinigungszwecke vielfältig, wie in Abbildung 2-2 zu sehen. Zur Trocknung werden am häufigsten die Bauteile abgeblasen, gefolgt von der Vakuum- und Heißlufttrocknung, d. h. auch in diesem Bereich kommen thermische Trocknungsverfahren häufig zum Einsatz [9].

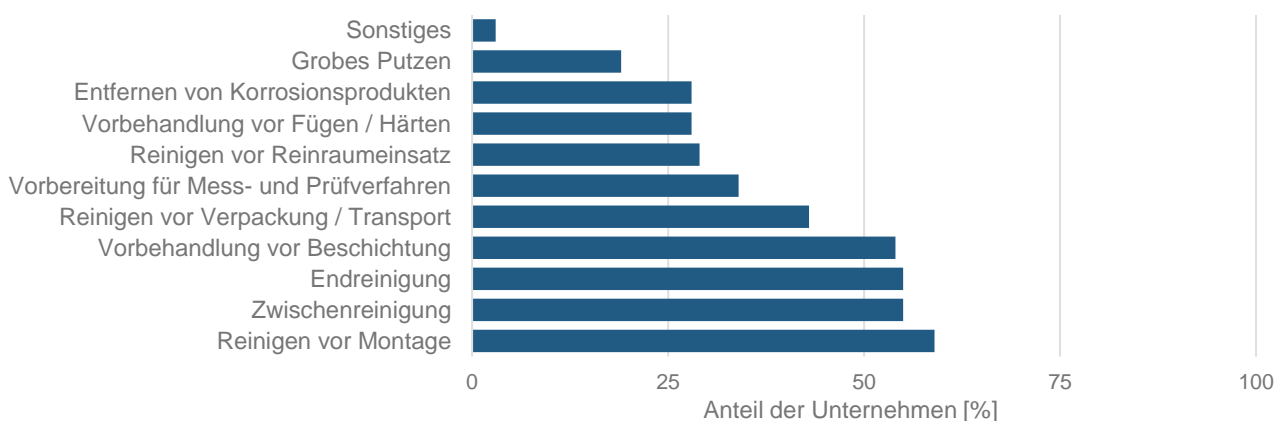


Abbildung 2-2: Zweck der industriell eingesetzten Reinigungsprozesse (Mehrfachnennung möglich) [9]

Trocknung in der Lackierung

Lacke kommen in verschiedenen Anwendungsbereichen zum Einsatz, am häufigsten jedoch zur optischen Aufwertung des jeweiligen Produkts oder dessen Schutz, z. B. vor Korrosion. Daher stellt das Lackieren in vielen Betrieben einen unverzichtbaren Schritt dar. [11]

Größter Abnehmer von Lacken in Deutschland ist mit Abstand die Automobilindustrie mit einer Verkaufsmenge von ca. 95.000 t im Jahr 2019 (Abbildung 2-3) [15]. Nach [16] werden im Jahr 2018 zudem 4.572 Lackierbetriebe für Kraftwagen in Deutschland gezählt. Aus diesem Grund wird im Folgenden der Fokus auf die Trocknung der Lackierung von metallischen Bauteilen gelegt. Je nach Anforderungsprofil stehen für die Metallteillackierung verschiedene Lacke und Verfahren zur Verfügung. Die wichtigsten Beschichtungsverfahren unterscheiden sich grundsätzlich in dem Aggregatzustand des aufzutragenden Materials bei der Applikation, diese sind das Nasslackieren, Tauchlackieren und das Pulverbeschichten. Die Lacktrocknung stellt dabei einen essenziellen Schritt dar, der den Prozess der Lackierung durch die Vernetzung des Lackes auf dem Produkt vollendet. [17]

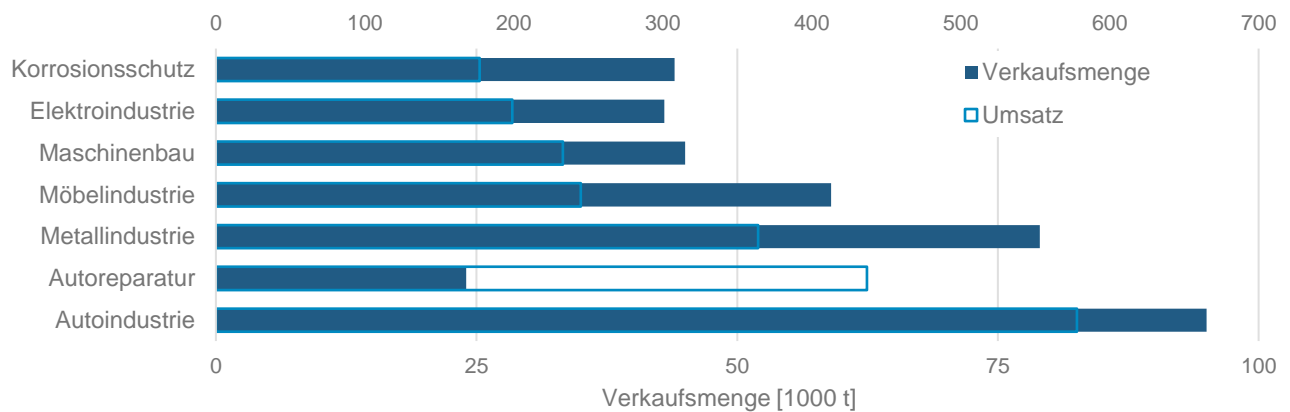


Abbildung 2-3: Einsatz von Lacken in den sieben größten Abnehmerbranchen der deutschen Industrie 2019 [15]

Hinsichtlich des Energiebedarfs stellt das Lackieren in Betrieben aller Größenordnungen eine wichtige Stellschraube dar, da es häufig über die Hälfte des gesamten Energiebedarfs der Produktion erfordert. Obwohl das Lackieren zu den energieintensiven Produktionsprozessen gehört, hat es einen Anteil von nur 5-15 % der Energiekosten. Dies liegt daran, dass für das Lackieren und insbesondere die Lacktrocknung ein hoher Wärmeaufwand notwendig ist, der über verhältnismäßig günstige fossile Energieträger bereitgestellt wird. Nichtsdestotrotz besteht vor dem Hintergrund steigender Energiepreise ein Optimierungsdruck zur Senkung des Energiebedarfs beim Lackieren. [11] Hierzu bieten sich in der die Lacktrocknung große Einsparpotentiale, wie in Kapitel 3 ausführlicher erläutert wird.

3. Energietechnische und -wirtschaftliche Bewertung

Trocknungsprozesse fallen unter den Bereich der Prozesswärmeanwendungen in der deutschen Industrie. Zur Einordnung in die Energielandschaft dient ein Blick auf Endenergieverbräuche der deutschen Industrie und die Rolle der Prozesswärme. Dabei stellt die Prozesswärme mit 67 % bzw. 1.794,5 PJ einen der höchsten Endenergieverbräuche dar (Abbildung 3-1) [18].

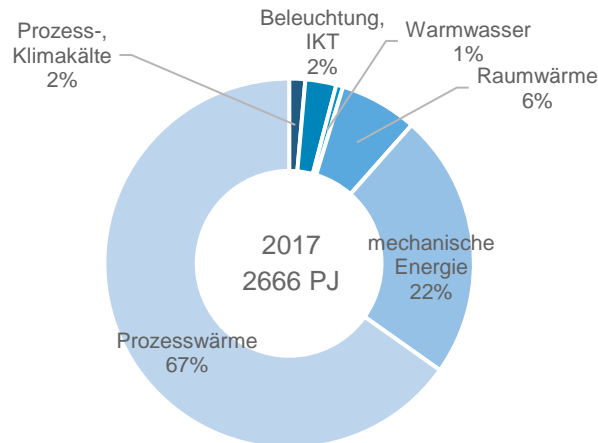


Abbildung 3-1: Endenergiebedarf deutscher Industrie in 2017 [18]

Besonders bei Temperaturniveaus unter 150°C spielen Trocknungsprozesse eine Rolle [19], wobei diese mit einem geschätzten jährlichen Energiebedarf von 200 PJ rund 60 % dieses Temperaturbereichs abbilden (Abbildung 3-2) [4, 10]. Dabei stellt vor allem die Trocknung in den Wirtschaftszweigen Ernährung und Tabak, Chemie, Gummi- und Kunststoffwaren, Lacke, Keramik, Druckerei, Textil, Holzverarbeitung große Prozesswärmeverbräuche mit insgesamt ca. 71 PJ [4, 10].

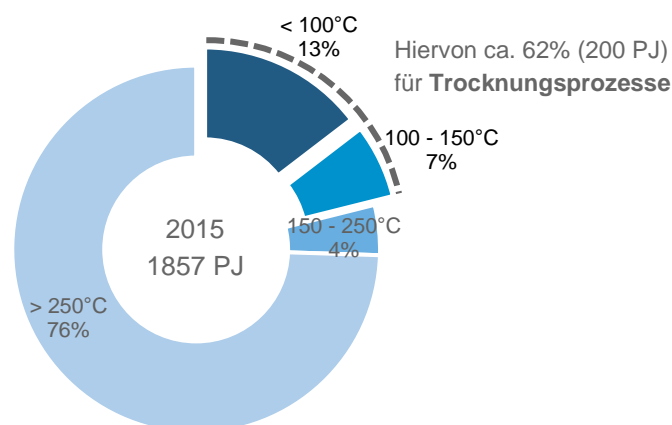


Abbildung 3-2: Verteilung deutscher Prozesswärme auf Temperaturniveaus in 2015 [4, 18, 20]

Auf der globalen Ebene betrug 2020 der Anteil industrieller Prozesswärme am gesamten Endenergiebedarf ca. 25 % [21], während allein im Industriesektor schon 2009 Prozesswärmeeanwendungen für ca. zwei Drittel verantwortlich waren [22].

Im Gegensatz zum Anteil des Energiebedarfs der Trocknung am Gesamtenergiebedarf kann der Anteil der Energiekosten für die Trocknung an den Gesamtkosten stark variieren. Hier ist insbesondere die Beheizungsart ein wichtiger Faktor – im Vergleich zu einer elektrischen Beheizung bringt eine brennstoffbasierte Beheizung häufiger finanzielle Vorteile aufgrund der erheblichen

Energiepreisunterschiede. Durchschnittlich bieten Energieeffizienzmaßnahmen ein Energieeinsparpotential von ca. 20 %. So wird der Umsetzung einer einzigen Energieeffizienzmaßnahme an jeder deutschen Trocknungsanlage insgesamt ein Energieeinsparpotenzial von ca. 47 PJ/a zugeschrieben. [4, 11, 12]

Aufgrund des vergleichsweise geringen Energiebedarfes der Bauteiltrocknung von metallischen Bauteilen im Vergleich zu anderen Anwendungsgebieten wird dieser Bereich energietechnisch und -wirtschaftlich nicht weiter analysiert. Stattdessen wird als energieintensiver Einsatzbereich von Trocknungsprozessen wird neben der Lackierung an dieser Stelle die Papierherstellung energietechnisch und -wirtschaftlich näher betrachtet.

Trocknung in der Lackierung

Wie bereits in Kapitel 2 eingeführt, stellt die Lacktrocknung einen wichtigen Schritt im gesamten Lackierprozess dar. Dabei spielt die Lacktrocknung aufgrund des hohen Wärmeaufwands auch energetisch eine wichtige Rolle, da sie 30-45 % des gesamten Energiebedarfs einer Lackieranlage beanspruchen kann (Abbildung 3-3). In Abhängigkeit von der Lackart werden zur Lacktrocknung Betriebstemperaturen zwischen 80-200°C benötigt. Werden mehrere Lackschichten aufgetragen, was bei Wasserlacken oft notwendig ist, findet der Trocknungsprozess ebenfalls mehrmals statt. Dadurch wird zur Trocknung von Wasserlacken trotz geringerer Temperaturen deutlich mehr Energie aufgewendet als für die Aushärtung von Pulverbeschichtungen, die als Einschichtlackierung aufgetragen werden, wie in Abbildung 3-3 zu sehen. Trotz geringerer Wärmebedarfe bei der Aushärtung von Pulverbeschichtung sollten jedoch die steigenden Wärmeverluste bei höheren Trocknungstemperaturen nicht vernachlässigt werden, welche in Abbildung 3-4 dargestellt sind. [11]

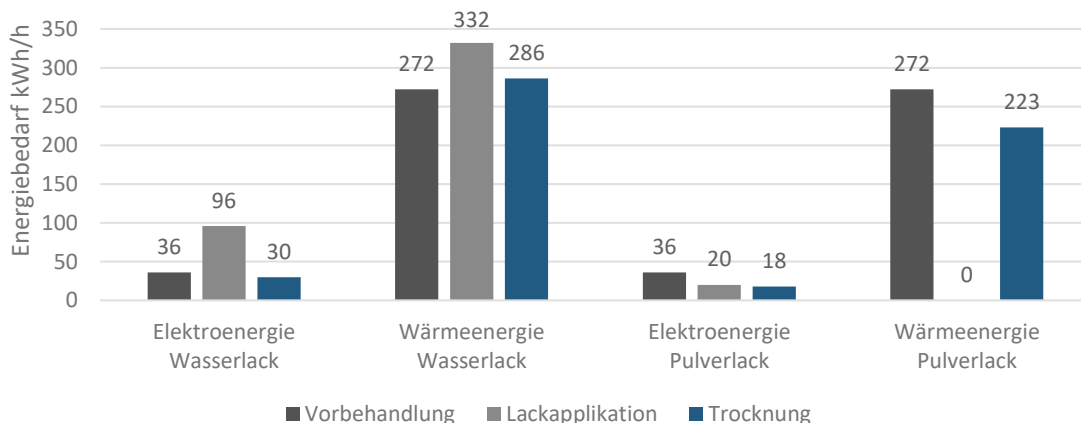


Abbildung 3-3: Energetischer Vergleich einer Wasser- mit einer Pulverlackieranlage [11]

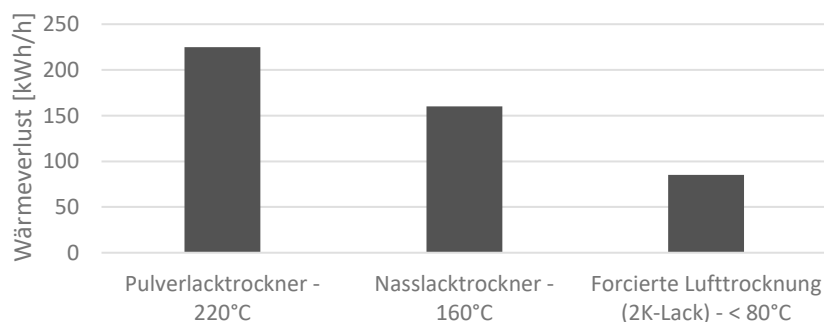


Abbildung 3-4: Wärmeverluste bei verschiedenen Trocknungstemperaturen [11]

Im Rahmen von Lackierprozessen in der Industrie wird für Trocknungsprozesse 8,9 PJ im Jahr verbraucht. Bei einem abgeschätzten Gesamtenergiebedarf von Lackieranlagen von 14,4 PJ pro Jahr stellt die Lacktrocknung einen besonders energieintensiven Anteil des Prozesses dar. [4]

Die für die Lacktrocknung benötigte Energie wird hauptsächlich als Wärmeenergie brennstoffbasiert bereitgestellt. Zum Betrieb von Ventilatoren und weiteren Hilfsaggregaten wird jedoch auch elektrische Energie benötigt. Die in einem Umlufttrockner vorhandenen Energieströme werden in Abbildung 3-5 gezeigt.



Abbildung 3-5: Energieströme in einem Umlufttrockner [11]

In dem eigentlichen Verfahrensschritt der Lacktrocknung können verschiedene Trocknungstechnologien in Frage kommen, deren Energiebedarf mit thermischer oder elektrischer Energie gedeckt werden müssen (Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1: Typische Energieverbraucher in der Lacktrocknung [11]

Trocknungstechnologie	Verbraucher	Energieart	Leistung [kW]	Einflussparameter
Umlufttrockner	Heizung	Therm.	60-900	Temperatur Massendurchsatz Abluftmenge Isolierung
	Umluftventilator	Elek.	4-60	
	Abluftventilator	Elek.	0,5-5	
IR-Strahlungstrockner	Strahlerheizung	Elek.	50-500	Trocknergröße Strahlerart Durchsatz Lackmenge
	Abluftventilator	Elek.	0,5-5	
UV-Strahlungstrockner	Versorgung UV-Lampen	Elek.	0,5-5	Trocknergröße Strahlerart Temperatur Durchsatz Lackmenge
	IR-Vorheizung	Elek.	5-10	
	Abluftventilator	Elek.	0,1-0,5	
Induktion	Induktorspulen	Elek.	5-50	Größe Durchsatz Temperatur Lackmenge
	Abluftventilator	Elek.	0,1-0,5	

Zur Versorgung von Lackieranlagen wird thermische Energie meistens aus fossilen Brennstoffen wie Gas oder Öl erzeugt [11]. Der verbreitete Einsatz von Konvektionstrocknern zur Lacktrocknung [4] erklärt somit den hohen thermischen Energieaufwand in diesem Verfahrensschritt. Trotz der geringeren Energieverbräuche bei elektrisch getriebenen Trocknungstechnologien (Tabelle 3-1) muss der Energiepreisunterschied zwischen fossilen Energieträgern und Strom berücksichtigt werden.

Nichtsdestotrotz kann der Einsatz elektrisch getriebener Trocknungstechnologien erhebliche Energieeinsparungen gegenüber der konventionellen Umlufttrocknung ermöglichen. Als Beispiel dient der Vergleich mit der IR-Strahlungstrocknung in Tabelle 3-2.

Tabelle 3-2: Vergleich von IR- und Umlufttrocknung bei der Aushärtung von lackierten Stahlrohren [11]

	IR-Strahlungstrocknung	Umlufttrocknung
Benötigte Grundfläche	10 m ²	200 m ²
Trocknervolumen	20 m ³	600 m ³
Energiebedarf	7,3 kWh _{el} /t	21 kWh _{therm} /t
Energiekosten	0,58 €/t	1,05 €/t

Hinsichtlich der Bauart in Durchlaufanlagen gibt es keine signifikanten Unterschiede zwischen der IR-Trocknung und der Umlufttrocknung. Bei der Trocknung massiver oder dickwandiger Werkstücke bietet jedoch die IR-Trocknung aufgrund der effizienteren Wärmeübertragung energetische Vorteile. Aufgrund der geringen Energiedichte von Luft als Wärmeträger sowie deren nötige Umwälzung werden für die Umlufttrocknung oft große Anlagenvolumina gefordert. Zur Trocknung mit IR findet dahingegen ein direkter Wärmeübergang zum Werkstück bzw. zum Lack statt, wodurch der Anlagenumfang deutlich reduziert werden kann. Damit fällt auch dementsprechend ein signifikanter Anteil der Wärmeverluste durch die Anlage weg. Trotz der höheren spezifischen Energiekosten von Strom können also durch den Einsatz von IR-Trocknern Energieeinsparungen von ca. 65 % und Energiekosteneinsparungen von fast 45 % erreicht werden. [11]

Trocknung in der Papierherstellung

Mit einem Anteil von knapp 3 % am gesamten Endenergiebedarf und ca. 9 % am Energiebedarf des verarbeitenden Gewerbes in Deutschland zählt die Papierindustrie zu den energieintensivsten Wirtschaftszweigen [23]. 2015 betrug der Gesamtenergiebedarf der Papierindustrie etwa 65,7 TWh/a [24] mit 162 Produktionsstandorten in Deutschland [25]. Dabei beträgt der Energiekostenanteil dieser Branche über 10 %, wodurch Energiepreise und Energieeffizienz der Prozesse einen erheblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Papierherstellung haben. [23]

Für die energetische Bewertung der Papierherstellung wird der Fokus nicht nur auf die Verfahrensschritte zur Papierherstellung aus Halbstoffen gelegt, sondern auch auf die Herstellung der jeweiligen Halbstoffe: Zellstoff, Holzstoff und Altpapierstoff. Dies ist wichtig, da die Energiebedarfe zur Halbstoffherstellung, insbesondere zur Zellstoffherstellung, teilweise höher sind als die zur Papierherstellung aus dem jeweiligen Halbstoff, wie in Tabelle 3-3 verdeutlicht.

Tabelle 3-3: Energieranddaten der Papier- und Halbstoffherstellung [23–26]

Produkt	Verfahren	Energiebedarf [kWh/t Produkt]		CO ₂ -Emissionen [kg/t Produkt]	Produktionsmenge DE 2015 [Mio t]
		Brennstoffe	Strombedarf		
Zellstoff	Sulfat-/Sulfitverfahren (inkl. Trocknung)	3.056 - 4.167	639	k. A.	1,61
Holzstoff	Schliffverfahren Refinerverfahren	-556 -1.111	2.000 2.694		0,95
Altpapierstoff	(Chemisch-) Mechanische Verfahren	150	260		13,98
Papierprodukte	Papiermaschine	1.528	530	600	22,6
Papierherstellung gesamt		1.767	832	627	22,6

Zur energetischen Beurteilung der Papierherstellung ist neben den Energieverbräuchen der eigentlichen Halb-/Endstoffproduktion auch von Interesse, ob es sich um eine integrierte Papierherstellung handelt. Findet die Herstellung von Faserstoff (insbesondere Zellstoff) zusammen mit Papier am selben Standort statt, ist die Rede von einer integrierten Papierherstellung. Wird der Faserstoff nicht am selben Standort hergestellt (nichtintegrierte Papierherstellung), muss dieser vor dem Transport entwässert und getrocknet werden, was mit einem höheren Energiebedarf – insbesondere zur Trocknung – verbunden ist. [25] In Abbildung 3-6 werden die Hauptprozessschritte der Papierherstellung und deren jeweilige Energieverbräuche dargestellt.

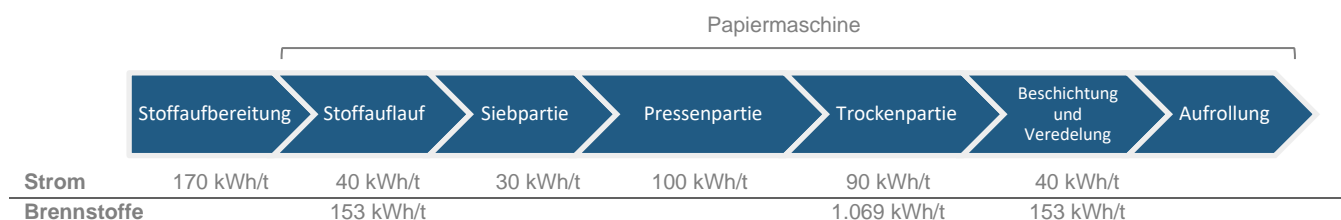


Abbildung 3-6: Hauptprozessschritte zur Papierherstellung und jeweilige Strom- und Brennstoffbedarfe [23, 25]

Wird der Fokus nur auf die Papierherstellung gelegt, beansprucht die Trockenpartie als größter Energieverbraucher rund 17 % des Strom- und 70 % des Brennstoffbedarfs [23]. Neben der Papierherstellung stellt auch die Trocknung in der Zellstoffindustrie einen signifikanten Anteil am Brennstoffbedarf des gesamten Papierprozesses dar (Abbildung 3-7) [23, 25].

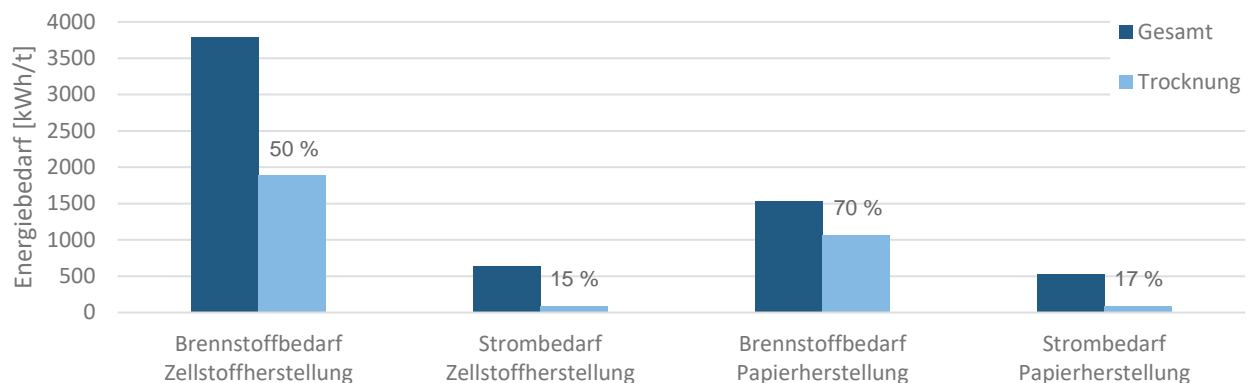


Abbildung 3-7: Brennstoff- und Strombedarf der Zellstoff- und Papierherstellung [23, 25]

Trotz des hohen Wärmebedarfs in der Papierindustrie, wovon ein signifikanter Anteil für Trocknungsprozesse aufgewendet wird, sind nur 18 % der eingesetzten Wärme fremdbezogen, da ein Großteil in Kraft-Wärme-Kopplung-(KWK-) Anlagen erzeugt wird [25]. Neben eigenerzeugter Wärme beträgt der Anteil des eigenerzeugten Stroms 46 %, wovon 93 % ebenfalls in KWK-Anlagen erzeugt werden [24].

Vor diesem Hintergrund spielen nicht nur für den Wärmebedarf, sondern auch für den Strombedarf die Bezugspreise fossiler Brennstoffe eine große Rolle, da diese zur Eigenerzeugung in KWK-Anlagen eingesetzt werden. Zur Senkung des Bedarfs an fossilen Brennstoffen können der Einsatz von Biomasse in der Zellstoff- und Papierindustrie, die Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen, der Einsatz von strombasierter Wärme in der Dampferzeugung und Trockenpartie und die Abwärmenutzung beitragen. [25]

4. Technologiezyklusanalyse

Im Rahmen der Verfahrenstechnik gehört die Trocknung zu den ältesten, verbreitetsten und vielfältigsten Grundprozessen. Von über 400 verschiedenen Trocknertypen finden über 100 Trocknertypen eine breite Anwendung in der Industrie. [27]

Bestätigt wird dies anhand der in der Patent- und Publikationsanalyse geringen Anzahl an identifizierten Veröffentlichungen über neuartige Trocknungstechnologien. Zudem setzt sich eine Trocknungsanlage aus verschiedenen Grundkomponenten zusammen, die unterschiedlich kombiniert werden können. Aus einer energetischen Perspektive sind dabei die wichtigsten Komponenten in Tabelle 1-1 aufgeführt. Vor diesem Hintergrund ist zur Charakterisierung des Technologiezyklus einer Trocknungstechnologie eher die Analyse der einzelnen Komponenten (z. B. der Beheizung) zielführend.

Anhand des Technologiezyklus nach [28] (Abbildung 4-1) lässt sich insgesamt die industrielle Trocknung als Querschnittstechnologie am Ende der Diffusionsphase platzieren. Diese Phase wird durch eine Diffusion und breite Anwendung auf den entsprechenden Märkten charakterisiert [29]. Dies lässt sich auch mit der sehr geringen Anzahl an aktuellen Patenten und Veröffentlichungen zu Trocknungstechnologien belegen.

Mit dieser Feststellung lässt sich jedoch nicht auf ein fehlendes Innovationspotential von Energieeffizienzlösungen in der Trocknung schließen. Der Förderdatenbank **EnArgus** [30] zufolge handelt es sich in den Forschungsprojekten der letzten zehn Jahre mit Bezug zu Trocknung mehr um Prozessoptimierung mit Relevanz zur Trocknung und weniger um technologische Neuentwicklungen. In Kapitel 5 wird sich daher auf die Rahmenbedingungen für die Entstehung und Verbreitung von Innovationen im Bereich industrieller Trocknung fokussiert.

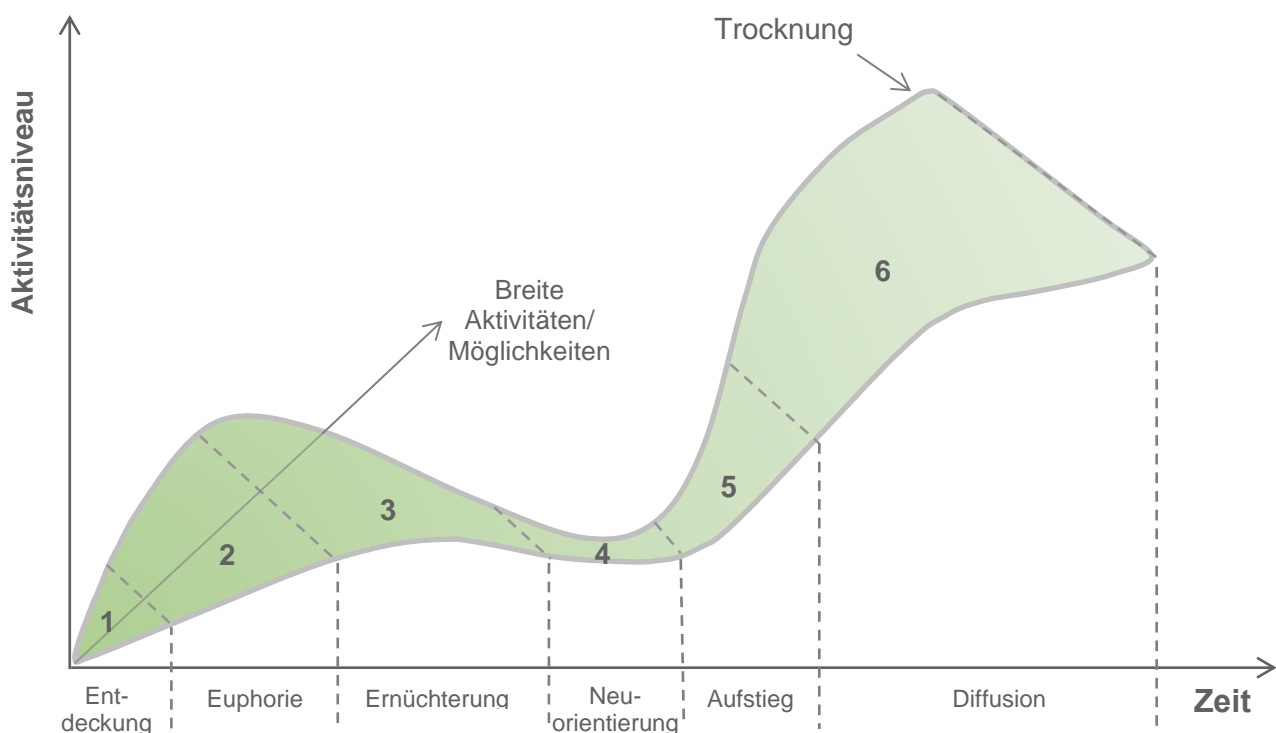


Abbildung 4-1: Technologiezyklen nach [28] und Einordnung der industriellen Trocknung. Während nach der Technologiezyklusanalyse die industrielle Trocknung als technisch und wirtschaftlich ausgereift aufgefasst wird, soll der Technologie-Reifegrad bzw. Technology Readiness Level (TRL) insbesondere die technologische Reife fokussieren. Auch hiernach wird die industrielle Trocknung

als qualifizierte und erfolgreich eingesetzte Technologie unter TRL 9 eingestuft. Die verschiedenen TRL Stufen sind Abbildung 4-2 zu entnehmen.

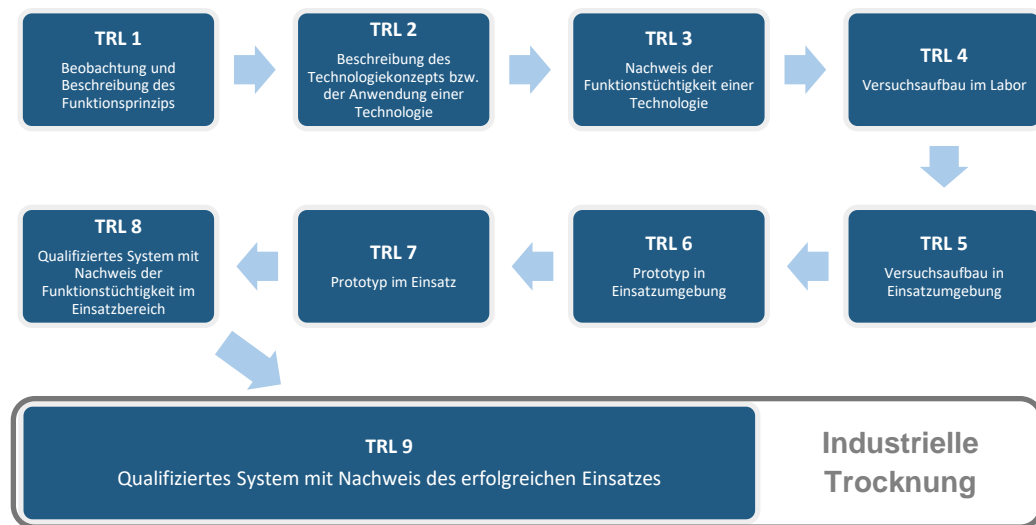


Abbildung 4-2: Einsortierung der Trocknung nach TRL [31]

5. Innovationssystemanalyse

Im Innovationssystem der industriellen Trocknung stellen Hersteller von Trocknungsanlagen, deren Anwender sowie Wissenschaft und Forschung die wichtigsten Akteure dar. Bezogen auf Forschungsprojekte zur Entwicklung der Trocknung in den letzten zehn Jahren sind Partner aus Industrie und Forschung beteiligt, wobei hier Industrieunternehmen vorrangig als Anwendungspartner vertreten sind. [30]

Aufgrund des allgemein fortgeschrittenen technologischen Reifegrads der industriellen Trocknung ist jedoch die Forschungsaktivität im Vergleich zu anderen aktuellen Themen eher gering. Außerhalb von Forschungsprojekten laufen Innovationen am häufigsten bilateral zwischen Herstellern und Anwendern von Trocknungsanlagen ab, wobei hier Kosteneinsparungen und nicht Energieeinsparungen als Ziel im Vordergrund stehen. [7]

Hinsichtlich der Forschungsaktivität in den letzten zehn Jahren lässt sich die thematische Ausrichtung wie in Tabelle 5-1 dargestellt strukturieren. Auf dieser Basis lässt sich feststellen, dass sich Innovationen im Bereich der industriellen Trocknung vorwiegend auf Optimierung einzelner Systemkomponenten oder Prozessparameter begrenzen und aus grundlegenden Veränderungen der Trocknungstechnologien hervorgehen. Nichtsdestotrotz lassen sich branchenübergreifend sowohl in der Forschung als auch im Markt einige wichtige Trends identifizieren:

1. Wärmepumpentechnik zur Abwärmenutzung
2. Strahlungstrocknung, einzeln oder in Kombination
3. Sorptionstrocknung

Einzelnen betrachtet sind die genannten Technologien keine Neuentwicklungen, jedoch wird deren Einsatz im Rahmen der industriellen Trocknung als vielversprechend und innovativ betrachtet, insbesondere vor dem Hintergrund eines umwelt- und produktschonenden sowie energieeffizienten Trocknungsbetriebs. Im Folgenden werden die Trends genauer betrachtet.

Tabelle 5-1: Thematische Ausrichtung der Forschungsprojekte der letzten zehn Jahren [30]

Trocknungsart	Konvektive Trocknung	Sprühtrocknung	Sorptionstrocknung
Anzahl Projekte	12	2	2
Anwendungsgebiete	<ul style="list-style-type: none"> • Papierherstellung • Textilherstellung • Zuckerherstellung • Ziegelherstellung • Druckindustrie • Baustoffherstellung 	<ul style="list-style-type: none"> • Kunststoffherstellung • Pharmaindustrie 	<ul style="list-style-type: none"> • Chemische Industrie • Maschinenbau
Stellschrauben und Methoden	<ul style="list-style-type: none"> • Prozessregelung • Übertragungsmedium • Beheizung • Technologiekombination • Simulationsgestützte Prozessoptimierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Zerstäubertechnik • Betriebsdruck 	<ul style="list-style-type: none"> • Sorbenzmaterial • Speicherstrategie • Prozessoptimierung
Wichtigste Themen	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz Wärmepumpen • Dampftrocknung • Assistenzsysteme • Produktoptimierung 	<ul style="list-style-type: none"> • Sprühgefriertrocknung • Scheibenzerstäubung 	<ul style="list-style-type: none"> • Flüssigsorbenzien
TRL der Innovationen	5 – 9	4 – 9	5 – 6

Wärmepumpentechnik

Das Energieeinsparpotenzial durch den Einsatz von Wärmepumpen in Trocknungssystemen findet bereits in verschiedenen Branchen Anwendung wie z. B. in der Ziegelherstellung oder in der Holztrocknung. Durch Integration einer Wärmepumpe in ein Abwärmenutzungskonzept kann insbesondere die in der feuchten Trocknungsabluft gespeicherte latente Wärme zurückgewonnen und dem Trocknungsprozess wieder zugeführt werden. So bietet nicht nur der Effekt der wiederverwerteten Wärme energetische Vorteile, sondern auch die getrocknete Prozessluft, die niedrigere Trocknungstemperaturen ermöglicht. Ist die eingesetzte Wärmepumpe zudem elektrisch angetrieben, wird im Zuge der Energiewende noch die Versorgung durch erneuerbaren Strom (statt fossilen Brennstoffen) möglich. [27]

Zum verbreiteteren Einsatz von Wärmepumpen in der industriellen Trocknung bedarf es jedoch teilweise an höheren Temperaturniveaus im Wärme-Output der Wärmepumpe. Dazu wird im Rahmen von Forschungsprojekten wie DryFiciency [32] der Einsatz von Hochtemperatur-Wärmepumpen zur Trocknung in Pilot-Anlagen erprobt und optimiert.

Strahlungstrocknung

Besonders im Bereich der Trocknung von Lacken oder dünnen Schichten (z. B. Papier) findet die Strahlungstrocknung, zumeist in Form von IR-Trocknung, verbreitet Anwendung. Aufgrund der hohen Leistungsdichte der elektromagnetischen Strahlung wie auch der hohen Wirkungsgrade bei der Umwandlung von elektrischer Energie zu Strahlungsenergie, bietet die Strahlungstrocknung gegenüber der konvektiven Trocknung Energieeinsparpotentiale. Neben den energetischen Vorteilen ermöglicht die Strahlungstrocknung eine kompakte Bauweise sowie rasche Prozessabläufe. Ferner bietet der Einsatz von Ultraviolett-(UV)-Strahlung, z. B. zur Trocknung von UV-Lacken, eine produktschonende Trocknung. Zu den Limitationen der IR-Strahlung gehören

jedoch die eingeschränkte Schichtdicke, die getrocknet werden kann, sowie die benötigte optische Zugänglichkeit. Ferner müssen zu jeder Trocknungsanwendung Betriebsparameter wie Abstand, Wellenlängenbereich und Intensität auf das Trocknungsgut angepasst werden. Zur Überwindung solcher Limitationen kann eine Kombination mit anderen Trocknungstechnologien beitragen. Da die meisten Trocknungsstrahler auch elektrisch versorgt werden können, ist auch hier der Einsatz durch erneuerbaren Strom möglich. [27]

Sorptionstrocknung

Ähnlich wie die Strahlungstrocknung wird die sorptive Trocknung bei der Trocknung von Wasserlacken bereits erfolgreich eingesetzt. In diesem Bereich wird hauptsächlich aufgrund der empfindlichen Oberflächen und damit verbundenen Grenzwerte für bestimmte Prozessparameter Wert auf die Entfeuchtung der Zuluft durch Kondensation oder Adsorption gelegt. Die mit entfeuchteter Trocknungsluft möglichen, niedrigeren Prozesstemperaturen versprechen Energieeinsparungen von bis zu 50 % im Vergleich zur Warmlufttrocknung. Zur Luftentfeuchtung mittels Adsorption kommen am häufigsten Sorbenzien als Feststoff zum Einsatz. Dabei wird der Flüssigkeitsdampf in den Sorbenzien adsorbiert, wodurch Wärme freigesetzt wird, die wiederum weiterverwertet werden kann. Neben der freigesetzten Wärme kann auch die gebundene Flüssigkeit bei der Desorption ebenso wiederverwertet werden. [4]

Entwicklungsbedarf besteht bei der Sorption insbesondere in der Senkung des Wärmebedarfs zur Desorption und im Umgang mit problematischen Nebenprodukten, die bei der Sorption entstehen können [33]. Während feste Sorbenzien bereits in verschiedenen Anwendungsbranchen zum Einsatz kommen, werden Flüssigsorbenzien für die Lufttrocknung noch aufgrund konstruktiver und regelungstechnischer Probleme weiterentwickelt und erprobt [34].

Einflussfaktoren im Innovationssystem

Zusammen mit Teilnehmer:innen im Fachgespräch Trocknung [7] wurden notwendige Voraussetzungen identifiziert, die Innovationen im Bereich der Trocknungstechnik potenziell begünstigen können. Da in Deutschland Hersteller von Trocknungsanlagen in verschiedensten Unternehmensgrößen vertreten sind, ist hier von einem Markt mit vielen Marktteilnehmern die Rede, was wettbewerbsbedingt Innovationen grundsätzlich fördern soll. Für die Entwicklung und Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen an Trocknungsanlagen müssen Energieeinsparpotentiale entlang des Maschinen-Lebenszyklus im Fokus stehen, statt Amortisationszeiten, die oft als zu lang bewertet werden. Dabei würde innerbetrieblich eine Gegenüberstellung von Betriebskosten und Investitionskosten helfen. Auch externe Faktoren wie Energie- und CO₂-Preise können den Optimierungsdruck, insbesondere hinsichtlich Energieträger und Energiebedarf, stark beeinflussen. Für kleine und mittelständische Unternehmen sind Förderbedingungen zur Implementierung von Energieeffizienzwerkzeugen und -maßnahmen oft nicht transparent genug oder die Antragsstellung für bestimmte Förderungen erweist sich als schwierig. Zusätzlich fehlt die Betrachtung von der Trocknung als Kernkompetenz in der Herstellung bzw. es müsste das Potential von trockener Luft als Energieform erkannt werden, welche häufig ungenutzt in die Abluft gegeben wird. Vor diesem Hintergrund lässt sich feststellen, dass sowohl für Hersteller als auch für Anwender Anreize für die Energieeffizienz und -flexibilität in Trocknungsprozessen fehlen. Soll nicht nur eine Energiebilanz, sondern auch eine CO₂-Bilanz gezogen werden, müssen zusätzlich getrocknete Flüssigkeiten und Volatile betrachtet und Regulatorik zur Integration dieser in eine Kreislaufwirtschaft eingeführt werden.

Zur Beurteilung des Markteinflusses auf Innovationen sollen folgende drei Fragen geklärt werden:

1. Wie sind Energieeffizienzmaßnahmen auf Altanlagen vs. Neuanlagen verteilt?
2. Haben Hersteller von Trocknungsanlagen einen Wettbewerbsvorteil durch energieeffiziente Anlagen?
3. Inwiefern eignen sich reinelektrische Trocknungsbeheizungen bei hohen Leistungen (z. B. zum Einsatz bei überschüssigen Grünstrom)?

Im Fachgespräch wurde zusätzlich darüber diskutiert, welche Innovationen aus einem *Technology Push* und welche aus einem *Market Pull* entstehen. Die zusammengetragenen Ergebnisse – mit starker Tendenz zu Innovationen aus einem *Technology Push* – bestätigen die getroffene Aussage, dass ein zu geringer externer Optimierungsdruck für Trocknungsanlagen besteht, insbesondere, was deren CO₂-Fußabdruck betrifft. Zu den wenigen gesammelten Innovationstreibern im *Market Pull* gehört beispielsweise der stärker werdende Blick auf die Lebenszykluskosten der Anlagen.

6. Ableitung möglicher Entwicklungsziele (technisch und ökonomisch)

Nach einer Studie wird das technische Energieeinsparpotential für Trocknungsprozesse in Industrie und Gewerbe in Deutschland auf 14 % geschätzt [10]. Zur energetischen Optimierung der Trocknung werden Maßnahmen und Potentiale identifiziert, die teilweise schon breite Anwendung in industriellen Trocknungsanlagen finden, sich teilweise aber auch noch in der Testphase befinden.

Zunächst werden technische Energieeffizienzpotentiale vorgestellt, die sich in fünf Kategorien einteilen lassen: Anlagentechnik, Beheizung, Prozessführung, Trocknungstechnologie und Vorprozesse. Anschließend werden Potentiale aus ökonomischen und organisatorischen Randbedingungen zusammengefasst. In Tabelle 6-1 werden die vorgestellten technischen Energieeffizienzmaßnahmen und deren Energieeinsparpotentiale gesammelt.

Anlagentechnik

Hinsichtlich der Anlagentechnik reichen die Energieeffizienzmaßnahmen von aufwandsarm, wie z. B. die Optimierung der Anlagendämmung, bis komplex, wie z. B. die Umsetzung einer Abwärmenutzung. Wie bereits in Kapitel 5 erläutert, kann der Einsatz von Wärmepumpen den Ausnutzungsgrad der Abwärme steigern, wobei hier zunächst gegebenenfalls vorhandene Limitationen bezüglich des Temperaturniveaus und der Verfügbarkeit abgebaut werden müssen. Je nach Produktionsumfeld kann eine prozessinterne Abwärmenutzung (Beispiel Bauteiltrocknung: Abwärme aus Schwadenkondensation wird Reinigungsbad zugeführt) oder auch eine prozessübergreifende Abwärmenutzung (Beispiel Ziegelherstellung: Abwärme aus Ofen wird dem vorgelagerten Trockner zugeführt) möglich sein. Zur Realisierung einer Abwärmenutzung werden jedoch Hilfskomponenten, wie z. B. Wärmeübertrager, Antriebe (Pumpen, Ventilatoren), Verrohrung und ggf. Wärmepumpen benötigt, die im Einzelnen mit eigenen Energieverlusten verbunden sind. Daher ist zunächst zu prüfen, ab welchen Abwärmemengen die Umsetzung eines solchen Abwärmenutzungssystems rentabel sein kann. [4, 27]

Neben dem Einsatz von energieeffizienten und bedarfsgerechten Aggregaten bieten insbesondere bei einer hohen Produktvariabilität teillastfähige Komponenten, wie z. B. Brenner, mehr Flexibilität unter Berücksichtigung der Energieeffizienz [7].

Weitere Einsparpotentiale liegen in der Materialauswahl von Trocknerkomponenten, wie z. B. der Förderanlage. Dabei soll deren Wärmeaufnahme möglichst reduziert werden, um die Beheizung zu entlasten [35].

Beheizung

Mit einem Anteil am Energiebedarf von über 75 % bei der konvektiven Trocknung stellt die Beheizung einen großen Stellhebel zur Senkung des Energiebedarfs dar [7]. Zur Erhöhung der Energieausbeute aus verbrennungsbasierten Beheizungen, die die Wärme in vielen Fällen indirekt über Wärmeübertragern dem Trocknungsprozess zuführen, kann eine direkte Beheizung beitragen. Dabei werden Verluste über Wärmeübertrager eliminiert. Dies ist aber nur möglich, wenn sich das jeweilige Trocknungsgut mit der abgashaltigen Trocknungsluft verträgt und keine Qualitätseinbuße zu erwarten sind. [4, 11]

Eine weitere Stellschraube in der Wärmezufuhr stellt das Wärmeübertragungsmedium dar. Mithilfe einer Dampftrocknung (Trocknung mit überhitztem Dampf statt Luft) können aufgrund der deutlich besseren Wärmeübertragungseigenschaften von Dampf sowohl die Trocknungsdauer als auch der Energiebedarf erheblich reduziert werden. Zudem kann rund 90 % der zur Beheizung zugeführten Energie zurückgewonnen werden. [4]

Zur zusätzlichen Steigerung der Energieflexibilität kann eine bivalente Wärmeerzeugung umgesetzt werden, indem je nach Energiepreis bzw. -verfügbarkeit zwischen Energieträgern (z. B. elektrische Heizelemente vs. Brenner) gewechselt werden kann [36].

Prozessführung

Die erste Stellschraube der Prozessführung, die sich insbesondere auf den Energiebedarf der Beheizung auswirkt, ist die Trocknungstemperatur, die einerseits die Trocknungsdauer und andererseits die Wärmeverluste aus dem Trockner beeinflusst. Da mit steigenden Prozesstemperaturen die Wärmeverluste steigen, bietet sich zur Energieeinsparung möglichst eine Reduzierung der Prozesstemperatur neben der Optimierung weiterer Prozessparameter in Bezug auf das spezifische Trocknungsgut an. Ebenso spielt bei konvektiven Trocknungsarten die Produktanordnung bzw. die Umströmung des Produkts durch das Wärmeübertragungsmedium eine signifikante Rolle beim Wärmeübergang, sodass eine Untersuchung und Optimierung dieser Faktoren weitere Energieeinsparungen ermöglichen können. [7, 11]

Zur Vermeidung von Über- oder Untertrocknung, insbesondere bei der Trocknung von verschiedenen Gütern im selben Trockner, kann die Umsetzung einer Feuchteregelung Abhilfe schaffen [4]. Da hierfür System- und Prozessverständnis vorausgesetzt werden und eine geeignete Prozessüberwachung existieren muss, was mit der marktgängigen Messtechnik hinsichtlich der Reaktionszeiten nicht immer erfüllt ist, kann sich diese Maßnahme schwierig gestalten [27]. Im Gegensatz dazu stellt die Abschaltung von Energieverbrauchern in Nichtnutzungszeiten eine vergleichsweise unkomplizierte organisatorische Energieeinsparmaßnahme dar [4].

Trocknungstechnologie

Aufgrund ihres einfachen Betriebs genießt die konvektive Trocknung eine große Einsatzbreite entlang der verschiedenen Anwendungsgebiete der deutschen Industrie [5].

Hinsichtlich des Energiebedarfs können jedoch, wie in Kapitel 5 erwähnt, andere Trocknungstechnologien, z. B. die Strahlungs- oder Sorptionstrocknung, je nach Trocknungsgut viel besser abschneiden. Hier kann beispielsweise bei der Vakuum- bzw. Niederdrucktrocknung aufgrund der geringeren Siedetemperatur von Wasser bei geringeren Umgebungsdrücken die Trocknungstemperatur gesenkt und somit der für die Beheizung nötige Energiebedarf erheblich reduziert werden. Aufgrund der höheren Leistungsdichte und geringeren Umwandlungsverluste können auch Strahlungstrocknung (z. B. IR- und UV-Trocknung) und Induktionstrocknung Energieeinsparungen ermöglichen. Zudem bietet die Trocknung mit entfeuchteter Luft (durch Sorption oder Kondensation) weitere energetische Vorteile. Für solche alternativen Trocknungsarten muss jedoch zunächst geprüft werden, inwiefern sie mit dem vorliegenden Trocknungsgut kompatibel sind (absorbierte Wellenlängen bei der Strahlungstrocknung, optische Zugänglichkeit, werkstoffabhängiger Induktionseffekt). [4]

Ein zusätzlicher Ansatz liegt in der Kombination von verschiedenen Trocknungstechnologien (z. B. IR mit Konvektion), um Synergien dieser auszunutzen [27]. Hier ist zu untersuchen, welche Technologien miteinander kompatibel sind und unter welchen Rahmenbedingungen die größten Energieeinsparungen ermöglichen, wie im Projekt LoTuS (Leistungsoptimierte Trocknung und Sauberkeit) [37] für den Fall der Bauteiltrocknung erforscht wird.

Vorprozesse

Wie die Nachprozesse wichtige Anforderungen an den Trocknungsprozess stellen, haben die Vorprozesse großen Einfluss auf den Energiebedarf beim Trocknen. In Abhängigkeit vom Trocknungsgut kann eine mechanische Vorentfeuchtung den Energieaufwand beim Trocknen reduzieren, da das Entfernen von Wasser durch thermische Verdampfung theoretisch ca. 100-mal mehr Energie benötigt als durch mechanische Abtrennungsverfahren. [4]

Neben der mechanischen Vorentfeuchtung kann allgemein der Einsatz von trocknungsfördernden Prozessmedien und womöglich eine Reduzierung der in Vorprozessen verwendeten Flüssigkeit den Energiebedarf der Trocknung weiter senken. Wichtig ist dabei, dass anhand einer geeigneten Energiebilanzierung darauf geachtet wird, dass Energiebedarfe nicht von einem Prozess in den anderen verlegt werden, sondern Energieeinsparungen möglichst holistisch wirken [7].

Weitere Potentiale

Neben technischen Einsparpotentialen bestehen weitere Stellhebel in der Interaktion zwischen Herstellern und Anwendern von Trocknungsanlagen sowie deren umgebenden markttechnischen Randbedingungen. Zum einen sollen, wie in Kapitel 5 erwähnt, Energie- und CO₂-Preise einen externen Optimierungsdruck erzeugen, durch den sowohl Hersteller als auch Anwender von Trocknungsanlagen motiviert werden, Entwicklungen zur Senkung des Energiebedarfs zu verfolgen. Eine Simulation der Trocknungsanlage bei bestimmten Produkten kann dabei helfen, einerseits Transparenz bezüglich Energieverbraucher und -hotspots zu schaffen, andererseits Ansätze für eine Betriebsoptimierung der Trocknungsvorgänge auf Kundenseite zu realisieren. Ferner können Informationen aus Anlagensimulationen eine Entscheidungsbasis für Kunden liefern. Zum Schluss lässt sich feststellen, dass ein enger Kontakt zwischen Kunden und Lieferanten generell dabei hilft, auf beiden Seiten das System- und Prozessverständnis zu stärken und so eine zielorientierte und energieeffiziente Prozessoptimierung umzusetzen.

Tabelle 6-1: Sammlung technischer Energieeffizienzmaßnahmen und deren Energieeinsparpotentiale bezogen auf den Gesamtenergiebedarf der Trocknungsanlage

Kategorie	Maßnahme	Energieeinsparpotential	Quelle
Anlagentechnik	Prozessinterne oder -übergreifende Abwärmenutzung ggf. mit Wärmepumpe	15 – 80 % ¹	[7, 27]
	Dämmung	8 – 23 % ¹	[27]
	Effiziente Nebenaggregate	k. A.	[7]
	Teillastfähige Brenner/Aggregate	k. A.	[7]
	Materialoptimierung hinsichtlich Wärmekapazität	k. A.	[35]
Beheizung	Direkte Beheizung	35 – 45 % ²	[4]
	Dampftrocknung	50 %	[4]
Prozessführung	Optimierung der Strömung bzw. Produktanordnung	k. A.	[7]
	Prozessparameter (produktspezifisch) optimieren	10 – 30 %	[38, 39]
	Feuchteregelung	5 %	[4]
	Abschaltung in Nichtnutzungszeiten	3 %	[11]
Trocknungs- technologie	Vakuumtrocknung	70 – 80 %	[39, 40]
	Strahlungstrocknung	20 – 50 %	[11, 39]
	Induktionstrocknung	75 %	[11]
	Mikrowellentrocknung	20 – 90 %	[4, 11, 39]
	Sorptionstrocknung	50 %	[4]
Vorprozesse	Mechanische Vorentfeuchtung	56 %	[4, 11]
	Trocknungsfördernde Prozesse und Prozessmedien	k. A.	[4]

¹ Energieeffizienzmaßnahme an einer Bauteilreinigungsanlage (Einkammeranlage) mit integrierter Trocknung. Energieeinsparpotential bezieht sich auf Gesamtenergiebedarf der Anlage.

² Einsparpotential bezieht sich auf den Brennstoffverbrauch einer Trocknungsanlage.

7. Identifikation von technologischen und ökonomischen Engpässen und Markthemmnissen

Im Folgenden werden ökonomische, organisatorische und technologische Hemmnisse vorgestellt, welche im Fachgespräch [7] und in der durchgeführten Recherche identifiziert wurden. In Anlehnung an die Maßnahmenkategorien in Kapitel 6 werden auch maßnahmenbezogene Hemmnisse identifiziert.

Ökonomische Hemmnisse

Ein Hemmnis, welches system- und technologieübergreifend die Akzeptanz von Umbaumaßnahmen erschwert, sind zu hohe Investitionskosten. Insbesondere, wenn der Fokus bevorzugt auf Investitionskosten und Amortisationszeiten liegt, statt auf dem Einsparpotential über den restlichen Lebenszyklus der Anlage durch reduzierte Betriebskosten, werden Effizienzmaßnahmen für die Entscheidungsträger schnell uninteressant. Dieser Effekt kommt besonders dann zum Tragen, wenn Entscheidungen über Betriebskosten und Investitionen nicht in ein und derselben Hand liegen. Zudem ist, wie bereits in Kapitel 5 erwähnt, nicht klar, inwiefern Hersteller von Trocknungsanlagen einen Wettbewerbsvorteil durch energieeffiziente Anlagen erzielen. [7]

Neben CO₂- und Energiepreisen, die noch keinen ausreichenden Optimierungsdruck erzeugen, fehlt bspw. im Bereich der Abwärme ein regulatorischer Druck. Da in Deutschland 2015 rund 83 PJ industrielle Abwärme ungenutzt freigesetzt wurde [41], könnte ein strenger regulatorischer Rahmen zur Reduzierung industrieller Abwärme Abhilfe schaffen. Ein weiterer Einflussfaktor wäre die Erarbeitung von Geschäftsmodellen zur außerbetrieblichen Abwärmenutzung durch Sektorenkopplung, wie bereits in Referenzprojekten wie [42] umgesetzt.

Analog zu Energieeffizienzmaßnahmen fehlt es auch bei Energieflexibilitätsmaßnahmen an Anreizen für die Flexibilisierung größerer Lasten, wie z. B. der Trocknungsbeheizung, da die Teilnahme an Regelenergiemärkten insbesondere für kleine und mittelständische Unternehmen oft schwierig oder nicht rentabel ist. [7]

Organisatorische Hemmnisse

Zu den externen ökonomischen Hemmnissen kommen unternehmensinterne organisatorische Hemmnisse hinzu, die die Entwicklung und Umsetzung von Maßnahmen zur energetischen Optimierung weiter erschweren. Dazu gehört an erster Stelle die Betrachtung der Trocknung als „notwendiges Übel“ statt als wertschöpfendes Verfahren. Dadurch mangelt es in vielen Betrieben an Motivation zur Entwicklung von Kernkompetenzen in der Trocknung im Produktionsumfeld oder hinsichtlich energetischer Fragestellungen. So wird das energetische Optimierungspotential in Trocknungsprozessen entweder ignoriert oder gar nicht erst erkannt. Vor diesem Hintergrund wird ebenso die energetische Bedeutung von trockener Luft oft unterschätzt, obwohl die energetisch aufwendige Lufttrocknung für verschiedene Prozesse neben der Trocknung unerlässlich ist. So wird trockene Luft nach vielen Prozessen ungenutzt in die Abluft gegeben, anstatt sie aufzubereiten und wieder einzusetzen. [7]

Wird ein Blick auf die CO₂-Emissionen geworfen, spielen im Bereich der Trocknung zwei Faktoren eine wichtige Rolle: Eingesetzte Energieträger und die Systemgrenze zur Bilanzierung. Neben dem tatsächlichen Energiebedarf werden die CO₂-Emissionen durch den verwendeten Energieträger stark beeinflusst. Im Bereich der Trocknung wird jedoch vermehrt festgestellt, dass bei Optimierungsarbeiten der Fokus mehr auf der Verfahrenstechnik liegt, während der Energieträger nicht als Bestandteil des betrachteten Systems angesehen wird. Zudem fehlt es im Energiemanagement oft an ganzheitlichen Betrachtungen und Bilanzierungen über die gesamte

Prozesskette, sodass CO₂-Emissionen über Prozesse entlang verschoben, statt ganzheitlich reduziert werden. [7]

Technologische Hemmnisse: Anlagentechnik

Im Folgenden liegt hinsichtlich technologischer Hemmnisse gegen die energetische Optimierung der Anlagentechnik der Fokus auf der Abwärmenutzung, da diese in der Umsetzung mit einem vergleichbar großen Aufwand verbunden ist.

Bei der thermischen Vernetzung von Abwärmequellen mit Wärmesenken zur Wärmerückgewinnung unterliegen die Energieeinsparpotentiale einigen entscheidenden Restriktionen, die in vielen Fällen eine rentable Abwärmenutzung erschweren:

1. Räumliche Kopplung der Erzeuger und Verbraucher, um Transportverluste zu minimieren.
2. Zeitliche Kopplung der Erzeuger und Verbraucher, um auf eine Zwischenspeicherung verzichten zu können.
3. Der Zustand der gas- oder luftgebundenen Abwärme soll mit den einzusetzenden Wärmeübertragern kompatibel sein (Verschmutzungsgrad, chemische Substanzen usw.).
4. Die Abwärme soll hinsichtlich Temperaturniveau und Leistung beim Verbraucher nutzbar sein. [4]

Um die Nutzbarkeit der Abwärme zu erhöhen, können in diesem Zusammenhang Wärmepumpen Abhilfe schaffen, indem insbesondere das Temperaturniveau für den Verbraucher angehoben werden kann. Da Wärmepumpen jedoch mit der Verdichterstufe einen Eigenbedarf haben, muss der thermische Nutzen mit dem einhergehenden elektrischen Aufwand ins Verhältnis gesetzt werden. Dabei können oft keine genauen Angaben zum Betriebsverhalten oder zur thermischen Leistung der einzusetzenden Wärmepumpe gemacht werden, was eine vorherige Bewertung erschwert. Eingesetzte Wärmepumpen sind zusätzlich noch mit Einschränkungen hinsichtlich erreichbarer Temperaturen, Versorgungssicherheit und Herausforderungen bezüglich der Steuerungstechnik und Systemintegration verbunden. Ein weiteres Hemmnis gegen den Einsatz von Wärmepumpen wird durch Arbeitsmedien mit hohem Treibhauspotential oder ozonabbauender Wirkung (z. B. Kältemittel mit teil(chlor)fluorierten Kohlenwasserstoffen (HFKW und HFCKW)) verursacht, die bei der Freisetzung umweltschädlich wirken. [7, 27, 40, 43, 44]

Technologische Hemmnisse: Beheizung

Wie in Kapitel 1 erläutert, ist die Beheizung in den meisten Trocknungsanlagen der größte Energieverbraucher und stellt den größten Stellhebel zur Energieeinsparung dar. Dabei sind Energieeffizienzmaßnahmen an der Beheizung häufig mit einer Änderung des Wärmeübertragungsmediums oder einem Eingriff in dessen Führung verbunden. Bei der Trocknung von empfindlichen Gütern stoßen diese Änderungen auf Angst vor unerwünschten Wechselwirkungen mit dem Trocknungsgut (z. B. bei der direkten Beheizung mit Verbrennungsgasen). Zudem kann, je nach Standort, fehlende Produktionsinfrastruktur den Einsatz alternativer Medien (z. B. Dampf zur Dampftrocknung) verhindern. [7]

Technologische Hemmnisse: Prozessführung

Zur Senkung des Energiebedarfs bei der Trocknung bietet die Prozessführung mehrere Stellschrauben. Die Änderung von Prozessparametern, wie z. B. Temperatur, kann dabei helfen, durch produktspezifische Prozesse die Energieeffizienz zu steigern. Die daraus resultierenden Einflüsse auf das Trocknungsgut bzw. dessen Qualität werden jedoch häufig kritisch angesehen, insbesondere wenn diese noch unbekannt sind. Zudem stehen produktspezifische Trocknungsanlagen im Widerspruch zu der in einigen Betrieben geforderten Prozessvariabilität. [7]

Eine entscheidende Stellschraube bezüglich der Prozessführung stellt der Trocknungsgrad dar. Einerseits ist in vielen Fällen der produktspezifische kritische Zielrocknungsgrad unbekannt, weshalb Trocknungsprozesse häufig erfahrungsbasiert ausgelegt werden. Dadurch kann nicht ausgeschlossen werden, dass eine Überrocknung vorliegt und unnötig hohe Trocknungsgrade erreicht werden. Andererseits ist für die meisten Anwendungsfälle aktuell keine echtzeitfähige Messtechnik zur Überwachung des Trocknungsgrads verfügbar, auf deren Basis eine Prozessregelung realisiert werden kann. [7]

Technologische Hemmnisse: Trocknungstechnologie

Da die weit verbreitete konvektive Trocknung aufgrund der häufig niedrigen Energiedichte des Trocknungsgases nicht optimal abschneidet in Bezug auf den Energiebedarf, kann ein Wechsel der Trocknungstechnologie energetische Vorteile bieten. Bei den verschiedenen alternativen Trocknungstechnologien muss im Einzelfall jedoch zunächst überprüft werden, inwiefern die jeweilige Technologie mit dem vorliegenden Trocknungsgut kompatibel ist. Limitationen und Nachteile sind dabei beispielsweise die Bildung von sogenannten „Hotspots“ an Stückgütern bei der Induktionstrocknung oder die begrenzte Materialdicke, die sich mit IR-Strahlung trocknen lässt. Um den hohen energetischen Aufwand bei der thermischen Verdampfung von Flüssigkeit bei thermischen Trocknungsarten zu umgehen, sollten zudem nicht-thermische Trocknungsverfahren (z. B. Sorptionstrocknung) weiterentwickelt werden, um eine breitere kommerzielle Einsetzbarkeit zu realisieren. [7]

Ferner wird der Ersatz von konvektiven Trocknungsanlagen durch deren Vorteile erschwert. Hierzu gehört an erster Stelle der simple konstruktive Aufbau, aus dem vergleichsweise geringe Investitionskosten hervorgehen. Zudem sind konvektive Trocknungsanlagen häufig sehr gut skalierbar, was z. B. bei IR-Trocknungsanlagen nicht der Fall ist. [6]

Sonstige Hemmnisse

Bei der Auslegung von Trocknungsprozessen wird sowohl auf Seiten des Anlagenherstellers ein umfassendes Systemverständnis der Anlagentechnik, als auch auf Seiten des Anlagennutzers ein tiefergehendes Verständnis des Trocknungsprozesses erfordert. Zur energetischen Optimierung der Anlage und des Prozesses wird jedoch zusätzlich eine Zusammenarbeit beider Seiten benötigt, welche aufgrund von Know-How-Gefällen zwischen den Seiten in vielen Fällen schwierig ist. Gemeinsame Untersuchungen und ausführliche Prozess- und Anlagenmodellierung könnten dabei Abhilfe schaffen. Dazu fehlen jedoch oft Kenntnisse der notwendigen Grundlagen und es wird grundsätzlich mehr Wert auf die Modellierung des isolierten Trocknungsprozesses als eine aufwändige Simulation der gesamten Trocknungsanlage gelegt. [7]

8. Empfehlungen und mögliche Policy-Maßnahmen

Zur branchenübergreifenden Schaffung von Voraussetzungen für energieeffiziente Trocknungsprozesse werden Forschungsansätze und -schwerpunkte sowie notwendige ökonomische Randbedingungen, die aus den im Fachgespräch [7] erarbeiteten Entwicklungszielen und Hemmnissen hervorgehen, zusammengefasst. Die im Folgenden genannten F&E-Aktivitäten sollen für Fördergeber als Empfehlung für vielversprechende Forschungsthemen dienen. Die ökonomischen Randbedingungen können potenziell in effektive politische Werkzeuge ausgedehnt werden, die möglicherweise einen Market-Pull zur Weiterentwicklung des Trocknungsprozesses bewirken.

Förderung von F&E-Aktivitäten

Hinsichtlich Trocknungstechnologien lassen sich zwei energetisch interessante Richtungen identifizieren: Einerseits können nicht-thermische Trocknungsverfahren erhebliches Einsparpotenzial versprechen (z. B. Sorptionstrocknung), andererseits sollten Trocknungsprozesse in Strategien zur CO₂-Neutralität eingebunden werden. Vor dem Hintergrund zunehmender erneuerbarer Energien könnten reinelektrische Beheizungen, die mit Grünstrom versorgt werden, eine Lösung sein. Jedoch sollte auch die Eignung CO₂-neutraler Brennstoffe in brennstoffbasierten Trocknungsverfahren geprüft werden.

Auch im Bereich der Trocknung sollte die Frage des Abwärmemanagements weiterhin thematisiert und Ansätze zur prozessinternen und -übergreifenden Abwärmenutzung erarbeitet werden. Diese können in transferierbaren Werkzeugen zur Identifikation und Methoden zur Umsetzung einer Abwärmenutzung resultieren, mit denen Betriebe befähigt werden sollen. Zur Steigerung des Abwärmenutzungsgrads kann ferner der Einsatz von Wärmepumpentechnologien signifikante Potenziale bieten. Dazu sollten jedoch Konzepte zur Integration in die jeweiligen Systeme entwickelt sowie Einschränkungen hinsichtlich maximal erreichbarer Temperaturen und klimaschädlicher Arbeitsmedien beseitigt werden.

Analog zu anderen industriellen Prozessen verspricht auch eine genaue Untersuchung und Optimierung der Prozessführung energetische Einsparpotentiale. Dies wird oft durch unzureichende Transparenz im Trocknungsprozess erschwert, weshalb die Entwicklung von übertragbaren Technologien zur Prozessüberwachung notwendig ist. In Kombination mit einer nachvollziehbaren und messbaren Definition des erforderlichen Zielrocknungsgrads, welcher oft durch Produkt- und Produktionsrandbedingungen vorgegeben wird, kann eine Weiterentwicklung in Richtung einer Prozessregelung für energieeffiziente produktspezifische Prozesse ermöglicht werden.

Um das Ziel transparenter Trocknungsprozesse zu realisieren, ist nicht nur eine Prozessüberwachung notwendig, sondern auch Aktivitäten zur Steigerung von anwendungsnahem Verständnis über die vorhandene Anlagentechnik und den Trocknungsprozess. Dieses Verständnis kann beispielsweise durch die gemeinsame Entwicklung von Anlagen- und Prozessmodellen sowohl auf Hersteller- als auch Anwenderseite bei der gezielten Gestaltung von energieeffizienten Trocknungsprozessen unterstützen.

Ökonomische Rahmenbedingungen

Zur Schaffung von Anreizen und Optimierungsdruck zur energetischen Optimierung von Trocknungsprozessen werden hauptsächlich drei Handlungsfelder identifiziert: Abwärmemanagement, Energieeffizienzmaßnahmen und Energieflexibilitätsmaßnahmen.

Im Bereich des Abwärmemanagements kann die Einführung von Regulatorik zur Reduzierung ungenutzter Abwärme Betriebe dazu motivieren, anfallende Abwärme durch Prozessoptimierung oder thermischer Vernetzung zu reduzieren. Gleichzeitig kann eine Förderung lohnender Geschäftsmodelle zur Vermarktung von Abwärme Betriebe zur außerbetrieblichen Abwärmenutzung bewegen.

Zur Steigerung der Energieflexibilität bei Anwendern von Trocknungsprozessen kann einerseits die Befähigung von Unternehmen zur Umsetzung energieflexibler Betriebsstrategien effektiv sein. Andererseits können insbesondere bei kleinen und mittelständischen Unternehmen angemessene Geschäftsmodelle Anreize zur Teilnahme am Regelenergiemarkt schaffen.

Zum Schluss sollen sowohl Hersteller als auch Anwender von Trocknungsanlagen – abgesehen von möglichen Kosteneinsparungen – dafür begeistert werden, Maßnahmen für CO₂-neutrale Trocknungsprozesse umzusetzen. Dies kann z. B. durch die monetäre Förderung von Energieeffizienzmaßnahmen geschehen, um Ängsten hinsichtlich langer Amortisationszeiten entgegenzuwirken. Ferner können steigende CO₂-Preise den Fokus auf eine Elektrifizierung der Trocknung mithilfe strombasierter Technologien, wie z. B. IR-Trocknung, lenken. Für Hersteller von Trocknungsanlagen soll unterstützend ein Wettbewerbsvorteil durch die Entwicklung von energieeffizienten Anlagen entstehen. Dies kann durch die Einführung von Instrumenten, wie dem EU Energy Label bei Haushaltsgeräten, erfolgen. Dadurch würden gleichzeitig Anwender von Trocknungsanlagen durch Information über die Energieeffizienzklasse eine Entscheidungshilfe zur Wahl energieeffizienter Anlagen erhalten.

Literaturverzeichnis

- [1] JOCHEM, Eberhard ; BRADKE, Harald ; MARSCHIEDER-WEIDEMANN, Frank ; SOM, Oliver ; MANNSBART, Wilhelm ; CREMER, Clemens ; DREHER, Carsten ; EDLER, Jakob ; EBERSBERGER, Bernd ; RADGEN, Peter ; RUHLAND, Stefan ; KREBS, Alexandra: *Improving the Efficiency of R&D and the Market Diffusion of Energy Technologies*. Heidelberg : Physica-Verlag, 2009
- [2] CARLSSON, Bo ; JACOBSSON, Staffan ; HOLMEN, Magnus ; RICKNE, Annika: *Innovation systems: analytical and methodological issues*. In: *Research Policy* (2002), Nr. 31, S. 233–245. URL
https://econpapers.repec.org/article/eeerespol/v_3a31_3ay_3a2002_3ai_3a2_3ap_3a233-245.htm
- [3] KRAUME, Matthias: Thermische Trocknung fester Stoffe. In: KRAUME, Matthias (Hrsg.): *Transportvorgänge in der Verfahrenstechnik: Grundlagen und apparative Umsetzungen*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2020, S. 427–476
- [4] BLESL, Markus ; KESSLER, Alois: *Energieeffizienz in der Industrie*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2017
- [5] VDMA - VERBAND DEUTSCHER MASCHINEN- UND ANLAGENBAU E.V.; PREUß, Guntram (Mitarb.): *Hersteller- und Lieferverzeichnis: Trockner und Trocknungssysteme*. Frankfurt am Main, 2019
- [6] LAND, C. M. van't: *Drying in the process industry*. Hoboken, N.J. : Wiley, 2012
- [7] EE4ING - ENERGIEEFFIZIENZ FÜR INDUSTRIE UND GEWERBE: *Fachgespräch Trocknung - durchgeführt am 11.03.2021*. 2021
- [8] SCHÖNHERR, Michael: *drying.de : Portal für industrielle Trocknungsanlagen*. URL
<http://www.drying.de/> – Überprüfungsdatum 2021-05-31
- [9] BILZ, Martin: *Markt- und Trendanalyse in der Industriellen Teilereinigung 2012*. Berlin : Fraunhofer-Allianz Reinigungstechnik, 2013
- [10] PROGNOSE AG: *Potenziale für Energieeinsparung und Energieeffizienz im Lichte aktueller Preisentwicklungen*. Basel und Berlin, 2007
- [11] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT; Fraunhofer IPA (Mitarb.): *Energieeinsparung in Lackierbetrieben - Langfassung : Klima schützen - Kosten senken*. Augsburg, 2006
- [12] KRÖLL, K. ; KAST, W. et al: *Trocknungstechnik. - Band 3: Trocknen und Trockner in der Produktion*. Berlin : Springer, 1989
- [13] SCHULZ, Doris: *Nicht nur sauber, sondern auch trocken*. In: *JOT Journal für Oberflächentechnik* 43 (2003), Nr. 4, S. 54–58
- [14] KOBLENZER, Gerhard: *Trends in der Automobil-Teilereinigung*. In: *JOT Journal für Oberflächentechnik* 56 (2016), Nr. 9, S. 74–76
- [15] VERBAND DER DEUTSCHEN LACK- UND DRUCKFARBENINDUSTRIE E.V.: *Lacke für Industrielle Anwendungen in Deutschland 2019 : Statistiken*. URL
<https://www.wirsindfarbe.de/statistiken/lacke-fuer-industrielle-anwendungen-in-deutschland-2018-1>. – Aktualisierungsdatum: 2020-02-05 – Überprüfungsdatum 2021-06-09
- [16] KORDS, Martin: *Anzahl der Lackierbetriebe für Kraftwagen in Deutschland bis 2018*. URL
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/321783/umfrage/anzahl-der-lackierbetriebe-fuer-kraftwagen-in-deutschland/> – Überprüfungsdatum 2021-06-10

- [17] KATRIN RICHTER ; DETLEF FAßHAUER ; ILKA HANDREG; Dr. Wolfgang Gloede (Mitarb.): *Handbuch Oberflächentechnik : auf Grundlage des Projektes "Qualifizierung Oberflächentechnik und -analytik"*. (gefördert mit Mitteln des Landes NRW und der EU). Dortmund, 2006
- [18] FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SYSTEM- UND INNOVATIONSFORSCHUNG: *Erstellung von Anwendungsbilanzen für die Jahre 2013 bis 2017 : Studie Studie für die Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V. (AGEB)*. Karlsruhe, Oktober 2018
- [19] FRISCH, Sabine ; PEHNT, Martin ; OTTER, Philipp ; NAST, Michael: *Prozesswärme im Marktanreizprogramm : Zwischenbericht zu Perspektivische Weiterentwicklung des Marktanreizprogramms*. 2010
- [20] SCHMITT, Bastian ; PAG, Felix: *Solare Prozesswärme : CO2-freie Wärme für Industrie und Gewerbe*. URL <https://www.ikz.de/detail/news/detail/solare-prozesswaerme/> – Überprüfungsdatum 2021-08-05
- [21] IEA: *Renewables 2020*. Paris, 2020
- [22] DEUTSCHE ENERGIE-AGENTUR GMBH: *Process heat in industry and commerce : Technology solutions for waste heat utilisation and renewable provision*. URL https://www.german-energy-solutions.de/GES/Redaktion/EN/Publications/GermanEnergySolutions/process-heat-in-industry-and-commerce.pdf?__blob=publicationFile&v=2. – Aktualisierungsdatum: 2016 – Überprüfungsdatum 2021-08-04
- [23] FLEITER, Tobias (Hrsg.): *Energieverbrauch und CO2-Emissionen industrieller Prozesstechnologien : Einsparpotenziale, Hemmnisse und Instrumente*. Stuttgart : Fraunhofer-Verl., 2013 (ISI-Schriftenreihe "Innovationspotenziale")
- [24] VERBAND DEUTSCHER PAPIERFABRIKEN: *Papier 2018. Ein Leistungsbericht*. Bonn, 2018
- [25] GODIN, Hélène; Navigant Energy Germany GmbH Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft BBG und Partner (Mitarb.): *Energiewende in der Industrie - Potenziale und Wechselwirkungen mit dem Energiesektor : Branchensteckbrief Papierindustrie*. 2019
- [26] SUHR, Michael ; KLEIN, Gabriele ; KOURTI, Ioanna ; GONZALO, Miguel Rodrigo ; SANTONJA, Germán Giner ; ROUDIER, Serge ; DELGADO SANCHO, Luis: *Best available techniques (BAT) reference document for the production of pulp, paper and board : Industrial emissions directive 2010/75/EU (integrated pollution prevention and control)*. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2015 (JRC science and policy reports 27235)
- [27] MUJUMDAR, Arun Sadashiv (Hrsg.): *Handbook of industrial drying*. 4. ed. Boca Raton, Fla. : CRC Press, 2015
- [28] MEYER-KRAHMER, Frieder ; DREHER, Carsten: *Neuere Betrachtungen zu Technikzyklen und Implikationen für die Fraunhofer-Gesellschaft*. In: *Forschungs- und Technologiemanagement: Potenziale nutzen - Zukunft gestalten* (2004)
- [29] FRIETSCH, Rainer ; LUTZ, Juliane ; NEUHÄUSLER, Peter ; SCHUBERT, Torben ; LERCH, Christian ; BETHKE, Nadine ; ROTHENGATTER, Oliver: *Der Beitrag der Fraunhofer-Gesellschaft zum deutschen Innovationssystem*. Karlsruhe, 2016
- [30] PROJEKTRÄGER JÜLICH ; BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE: *EnArgus : Förderdatenbank Energieforschung*

- [31] DIN EN 16603-11:2020-02, *Raumfahrttechnik_ - Definition des Technologie-Reifegrades_ (TRL) und der Beurteilungskriterien (ISO_16290:2013, modifiziert); Deutsche Fassung EN_16603-11:2019*
- [32] AUSTRIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY: *Project DryFiciency*. URL <http://dry-f.eu/> – Überprüfungsdatum 2021-08-13
- [33] WIEDEMANN, Thomas ; LUBENAU, Udo ; WEYD, Marcus: *Verbundvorhaben MemTEG - Abschlussbericht : Glykoltrocknung mittels anorganischer Membranen - Teilvorhaben: Anlagenimplementierung und großtechnischer Versuch*. Essen, 2017
- [34] PÄßLER, Tina ; HUBER, Martin ; SCHOTTENHAMMER, Sebastian ; HOCHSCHULE FÜR TECHNIK STUTTGART: *Verbundvorhaben SorpStor - Abschlussbericht : Entwicklung eines luftgeführten thermo-chemischen Flüssigsorptionsspeichersystems für Kühl-, Heiz- und Trocknungsanwendungen*. Stuttgart, 2016
- [35] SCHRÜBBERS, Hans ; SCHRÜBBERS, Steffen ; GUDDATIS, Regine: *Steigerung der Energie- und Materialeffizienz beim Lackieren*. In: *JOT Journal für Oberflächentechnik* 53 (2013), Nr. 4, S. 36–39
- [36] SAUER, Alexander: *Energieflexibilität in der deutschen Industrie*. Stuttgart : Fraunhofer Verlag, 2019
- [37] INSTITUT FÜR PRODUKTIONSMANAGEMENT, TECHNOLOGIE UND WERKZEUGMASCHINEN: *Projekt LoTuS - Leistungsoptimierte Trocknung und Sauberkeit*. URL <https://eta-fabrik.de/forschung/projekt/lotus-leistungsoptimierte-trocknung-und-sauberkeit/> – Überprüfungsdatum 2021-11-29
- [38] C. STRUMILLO ; P.L. JONES ; R. ŻYŁŁA: *Energy Aspects in Drying*. In: MUJUMDAR, Arun S. (Hrsg.): *Handbook of Industrial Drying* : CRC Press, 2014, S. 947–966
- [39] DR. P. GOODMAN, DR. C ROBERTSON ; A. SKARSTEIN ; L. LYONS ; S. PAHAL: *Sustainable Industrial Policy – Building on the Eco-design Directive – Energy-Using Products Group Analysis / 2 : Lot 4: Industrial and Laboratory Furnaces and Ovens – Tasks 1 – 7 Final Report*. 2012
- [40] MINEA, Vasile: *Industrial Heat Pump-Assisted Wood Drying* : CRC Press, 2018
- [41] KÖNIG, Jan D. ; SOMMER, Michael ; GROß, Bodo ; AL, et: *Erhebung, Abschätzung und Evaluierung von industrieller Abwärme in Deutschland - Potentiale und Forschungsbedarf : Abschlussbericht des Verbundvorhabens*. Laufzeit des Vorhabens: 01.01.2015 - 30.06.2018. Freiburg/Brsg
- [42] KATHARINA FRAUNE: *Rheinfelder Industriegebiete sind Vorreiter - Evonik Industries*. Rheinfelden, 16.12.2019. URL <https://corporate.evonik.com/de/presse/pressemitteilungen/standorte/standort-rheinfelden/rheinfelder-industriegebiete-sind-vorreiter-159792.html> – Überprüfungsdatum 2021-08-27
- [43] UMWELTBUNDESAMT: *Treibhauspotentiale (Global Warming Potential, GWP) ausgewählter Verbindungen und deren Gemische gemäß Viertem Sachstandsbericht des IPCC bezogen auf einen Zeitraum von 100 Jahren*. URL <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2503/dokumente/treibhauspotenti>

[44] MINEA, Vasile: *Advances in Heat Pump-Assisted Drying Technology* : CRC Press, 2016